



**Universidade de  
Aveiro  
2008**

Departamento de Física

**Ana  
Cordeiro Pires**

## **Vórtices associados à corrente dos Açores: técnicas Lagrangianas**

dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia e Oceanografia Física, realizada sob a orientação científica do Doutor Álvaro Peliz, investigador auxiliar do Instituto de Oceanografia da Universidade de Lisboa e co-orientação do Doutor Jesús Dubert, Professor Auxiliar Convidado do Departamento de Física da Universidade de Aveiro



## **o júri**

presidente

**Prof. Doutor Paulo Silva**

professor auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

**Doutor Álvaro Peliz**

investigador auxiliar do Instituto de Oceanografia da Universidade de Lisboa

**Prof. Doutor Jesús Dubert**

professor auxiliar convidado do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

**Prof. Doutor Joaquim Dias**

professor auxiliar da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa



## **agradecimentos**

O presente trabalho não teria sido possível sem os meus dois orientadores, Doutor Álvaro Peliz e Prof. Doutor Jesús Dubert. Agradeço-lhes profundamente por me terem oferecido esta oportunidade, por terem apostado em mim e por terem sido sempre tão atenciosos e gentis. Tem sido uma honra.

Este último ano teria sido muito difícil se não tivesse tido a sorte de o partilhar com a Magda, sucessos e frustrações, alegrias e tristezas. Estou muito grata pela sua companhia e amizade.

Não posso deixar de agradecer aos meus pais, por todo o apoio que sempre me deram nas minhas decisões, pela força que me incutem, pela fé que depositam nas minhas capacidades.

Por fim, ao Alexandre, simplesmente por existir na minha vida.

Este trabalho foi realizado no âmbito do projecto com apoio da FCT : A corrente dos Açores da Madeira ao Golfo de Cadiz (Aguca - PTDC/MAR/64902/2006) e financiado pelo Laboratório Associado CESAM – Centro de Estudos do Ambiente e do Mar, e pelo projecto CLIBECO – Alterações Climáticas no Ecossistema Ibérico de Afloramento: uma análise de retrospectiva e um estudo de cenários (PPCDT/CLI/57752/2004).



## palavras-chave

Sistema de correntes dos Açores, vórtices de mesoscala, flutuadores Lagrangeanos, instabilidade baroclínica.

## resumo

A actividade de mesoscala é comum em todo o oceano. Os fenómenos que estão na sua génese estão intimamente interligados com a circulação geral, pelo que é muito importante compreender aprofundadamente os mecanismos que lhe são associados. Os vórtices de mesoscala são estruturas rotativas que resultam da estratificação do oceano e consequentes situações de instabilidade.

Este trabalho consiste num estudo estatístico e de caracterização de vórtices de mesoscala associados ao sistema de correntes dos Açores. Para tal, recorreu-se a flutuadores Lagrangeanos de superfície. Através da detecção de ciclos efectuados por estes flutuadores ao longo das suas trajectórias na região em estudo, pôde inferir-se sobre a existência de vórtices, bem como a sua distribuição geográfica, dimensões espaciais e temporais, características de rotação e translação e ainda energia cinética associada. A banda de 28°-37°N tem um bom número de ocorrências, com uma predominância de deslocação dos flutuadores para Oeste. Foram observados ciclos até um máximo de 218 dias, com um período médio de 16 dias e um diâmetro de cerca de 70 km. As velocidades de rotação rondam os 16 cm/s, atingindo até cerca de 40 cm/s, e as de translação cerca de 2 cm/s. Houve uma série a percorrer até 519 km de distância.

O objectivo foi também, no seguimento do trabalho de Alves *et al.* (2002), verificar as suas observações relativamente à disparidade em número, dimensões e sentido de rotação dos vórtices encontrados a Norte e a Sul do eixo médio da Corrente dos Açores (~34°N). De facto, tendo em conta a deflexão do eixo médio da corrente para Sul a cerca de 20°W, o presente estudo confirma parcialmente o contraste Norte-Sul proposto por aqueles autores. Os parâmetros calculados e as comparações relativas entre ciclones e anticiclones conferem ainda com outros autores, tais como Paillet (1999), Pingree *et al.* (1999) e Le Cann *et al.* (2005), tanto na totalidade da região, como quando considerando sub-regiões sujeitas a diferentes padrões de circulação de base.





**keywords**

Azores Current system, mesoscale vortices, Lagrangian floats, baroclinic instability

**abstract**

Mesoscale activity is found all over the ocean. The phenomena responsible for their origin have an important connection with general circulation, and, for this reason, the understanding of the mechanisms behind them is of the utmost importance. Mesoscale vortices are rotational features that are a result of the ocean stratification and consequent instability situations.

This work consists of a statistical study and a characterization of the mesoscale vortices associated to the Azores Current system of the Azores. In order to proceed, a set of available Lagrangian surface floats was used. While they circulated throughout the study area, their trajectories looped when caught by vortices. Through the analysis of these looping series, inferring on the geographical distribution, spatial and temporal scales, rotation and translation characteristics as well as EKE measurements of the vortices was made possible. The latitudinal band of 28°-37°N has a good record of looping series and it can be observed that the floats moved mainly westwards. The maximum looping series duration was 218 days, with an average period of 16 days and an average diameter of about 70 km. Swirl speeds are of the order of 16 cm/s, reaching up to 40 cm/s, and translation speeds of 2 cm/s. The maximum of distance crossed was 519 km.

The purpose was also, in light of the work by Alves *et al.* (2002), to check their observations relating the major differences of number, dimensions and rotation direction between the vortices found north and south of the mean axis of the Azores Current (~34°N). In fact, taking into account the current's southward retroflexion at about 20°W, the present study confirms such a contrast as referred by the authors. The calculated parameters and the relative comparisons between cyclones and anticyclones concord with other authors such as Paillet (1999), Pingree *et al.* (1999) e Le Cann *et al.* (2005), both in the whole area and when considering sub-regions that are influenced by different circulation background patterns.



## Índice

<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>V</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>VI</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>XIII</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS .....</b>	<b>XV</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 TURBILHÕES DE MESOSCALA .....	1
1.2 ÁREA EM ESTUDO.....	2
1.3 OBJECTIVOS DO TRABALHO.....	5
<b>2 ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>7</b>
<b>3 DADOS E METODOLOGIA .....</b>	<b>11</b>
<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>17</b>
4.1 ÁREA TOTAL E SUB-REGIÕES .....	17
4.2 CORRENTE DOS AÇORES .....	33
<b>5 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES.....</b>	<b>39</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>41</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>45</b>
NOTAS SOBRE TURBILHÕES .....	45



## Índice de Figuras

Figura 1.1 – Representação esquemática das correntes do Atlântico Norte (Tomczak e Godfrey, 2001). .....	3
Figura 1.2 – Representação esquemática da origem e evolução de meandros numa corrente zonal de propagação Oeste-Este. $A^-$ : anticiclones (vorticidade negativa); $C^+$ : ciclones (vorticidade positiva). .....	4
Figura 3.1 – Área em estudo e sub-regiões definidas para análise: a cinzento, a divisão em quadrantes; a vermelho, a faixa centrada no eixo médio da Corrente dos Açores. As linhas batimétricas correspondem às profundidades 200, 600, 1000 e 2000 m. O sombreado corresponde a terra. ....	12
Figura 3.2 – Cobertura dos dados: totalidade das trajectórias dos flutuadores analisados, presentes na área em estudo entre 1991 e 2007. As linhas batimétricas correspondem às profundidades 200, 600, 1000 e 2000 m. O sombreado corresponde a terra. ....	13
Figura 3.3 – Exemplo de uma série de ciclos identificada na trajectória de um flutuador. Os pontos correspondem a pares coordenados consecutivos. A batimetria está de acordo com as figuras anteriores. ....	14
Figura 4.1 – Séries de ciclos identificadas, distinguidas em ciclones (azul) e anticiclones (vermelho). A cinzento, a divisão em quadrantes; a vermelho, a faixa centrada no eixo médio da Corrente dos Açores. A legenda mostra o nº de identificação da bóia respectiva. As linhas batimétricas correspondem às profundidades 200, 600, 1000 e 2000 m. O sombreado corresponde a terra. ....	18
Figura 4.2 – Quantidade de registos por sub-região, em “anos de dados”. ....	19
Figura 4.3 – Distribuição espacial das séries de ciclos por sub-região. As partições azuis representam ciclones, as vermelhas anticiclones e os valores correspondentes estão a branco. Em baixo, os valores totais e a probabilidade de ocorrência correspondente. ....	19
Figura 4.4 – Alguns exemplos de séries de ciclos. ....	21
Figura 4.5 – Mínimos, médias e máximos dos diferentes parâmetros (cf. Tabela 3.1), respectivos aos ciclones (coluna da esquerda) e aos anticiclones (coluna da direita), por sub-região (NE, SE, SW, NW) e na totalidade da área (tot). ....	22
Figura 4.6 – Diâmetro e deslocamento médios de cada série de ciclos. O círculo representativo está centrado na posição inicial da série e os deslocamentos correspondem aos dos centros médios dos ciclos. As séries ciclónicas estão a azul, as anticiclónicas a vermelho. A escala de grandeza dos diâmetros está indicada no canto inferior direito. As linhas batimétricas correspondem às profundidades 2000, 1000, 600 e 200 m. O sombreado corresponde a terra. ....	24
Figura 4.7 – Trajectórias das séries respectivas aos máximos de (a,b) duração e deslocamento; (c,d) velocidade de rotação; (e,f) diâmetro; (g,h) nº de Rossby. ....	26
Figura 4.8 – Representação do raio (km) em função da velocidade de rotação (cm/s) de cada série de ciclos distinguidas por direcção de rotação (círculos azuis: ciclones; asteriscos vermelhos: anticiclones). ....	29
Figura 4.9 – O mesmo do que a Figura 4.8, mas valores divididos por sub-região: NE, SE, SW e NW. ....	29
Figura 4.10 – Representação do nº de Rossby em função da latitude (°N) de cada série de ciclos distinguidas por sentido de rotação (círculos azuis: ciclones; asteriscos vermelhos: anticiclones). ....	30

Figura 4.11 – Representação do nº de Rossby em função da EKE ( $\text{cm}^2/\text{s}^2$ ) de cada série de ciclos distinguidas por sentido de rotação (círculos azuis: ciclones; asteriscos vermelhos: anticiclones).	30
Figura 4.12 – Representação do nº de Rossby em função do raio (km) de cada série de ciclos distinguidas por sentido de rotação (círculos azuis: ciclones; asteriscos vermelhos: anticiclones).	31
Figura 4.13 – O mesmo do que a Figura 4.12, mas valores divididos por sub-região: NE, SE, SW e NW.	31
Figura 4.14 – Representação do nº de Rossby em função da velocidade de rotação ( $\text{cm/s}$ ) de cada série de ciclos distinguidas por sentido de rotação (círculos azuis: ciclones; asteriscos vermelhos: anticiclones).	32
Figura 4.15 – Representação do nº de Rossby em função da velocidade de translação ( $\text{cm/s}$ ) de cada série de ciclos distinguidas por sentido de rotação (círculos azuis: ciclones; asteriscos vermelhos: anticiclones).	32
Figura 4.16 – (a) Nº de ciclones (azul) e nº de anticiclones (vermelho) em função da latitude. (b) Representação do diâmetro e velocidade de translação médios de cada série de ciclos (séries ciclónicas a azul, anticiclónicas a vermelho) e escoamento médio base (a cinzento). Os círculos representativos dos diâmetros e os vectores de velocidade estão centrados nas posições iniciais de cada série. A escala dos diâmetros está indicada no canto superior direito e a dos vectores no canto inferior direito.	33
Figura 4.17 – Mínimos, médias e máximos dos diferentes parâmetros (cf. Tabela 3.1) para a faixa da Corrente dos Açores ( $30\text{--}38^\circ\text{N}$ ), respectivos aos ciclones (C), aos anticiclones (A) e no global (tot).	34
Figura 4.18 – Médias zonais em função da latitude (coluna da esquerda) e médias meridionais em função da longitude (coluna da direita) de: (a) EKE; (b) Nº de Rossby; (c) u médio; (d) v médio. As séries a traço contínuo negro com círculos são as calculadas, a verde está representado o escoamento médio (Lumpkin e Garrafo, 2005) e a tracejado está representada a diferença entre os dois. A linha azul marca o zero.	36
Figura 4.19 – O mesmo do que a Figura 4.18, mas diferenciando os registos em ciclones (azul) e anticiclones (vermelho). Aqui, a linha do zero está a negro.	37
Figura A.0.1 – Representação esquemática de um anticiclone (adaptado de Cushman-Roisin, 1988).	48
Figura A.0.2 – Representação esquemática dos efeitos de rotação de um anticiclone nas parcelas de água circundantes (círculos a azul) (adaptado de Cushman-Roisin, 1988).	49

## Índice de Tabelas

Tabela 3.1 – Parâmetros característicos calculados para cada série de ciclos.....	14
Tabela 4.1 – Distribuição temporal das séries de ciclos, distinguida por sentido de rotação. .....	20
Tabela 4.2 – Extremos e médias dos parâmetros calculados para as séries de ciclos por sub- região e globais (cf. Tabela 3.1). .....	23





# 1 Introdução

## 1.1 *Turbilhões de mesoscala*

Turbilhões (ou “eddies”) de mesoscala definem-se como vórtices coerentes com movimento de rotação e translação, cuja estrutura é aproximadamente simétrica em relação ao eixo de rotação (Shoosmith *et al.*, 2005; Paillet, 1999). As suas dimensões características são de cerca de 50 a 500 km e o seu tempo de vida pode ir de várias semanas a dezenas de meses (Pond e Pickard, 1983). Os vórtices podem gerar-se tanto em condições de instabilidade barotrópica como de instabilidade baroclínica. Na primeira situação, a sua energia provém da energia cinética do escoamento médio; na segunda, a fonte de energia é a energia potencial disponível inerente à inclinação das superfícies isobáricas em relação às isopícnicas, típica da baroclinicidade, que é convertida em energia cinética turbulenta (“eddy kinetic energy” – EKE).

Nas regiões costeiras também pode ocorrer geração de turbilhões devido à topografia (muito frequente na presença de ilhas, por exemplo) ou a correntes existentes no talude continental, como é o caso dos chamados “swoddies” (Slope Water Oceanic eDDY) um termo inventado por Pingree e Le Cann (1992) para descrever as extensões da corrente do talude continental na parte sul do Golfo da Biscaia durante o Inverno, que evoluem para anticiclones com um núcleo superior de água do talude. Um “swoddy” típico tem um diâmetro de 50-100 km, períodos de rotação de 15-20 dias e velocidades de translação de 1-2 cm/s. Outro tipo de turbilhões também muito estudado é o “meddy” (Mediterranean Eddy), um turbilhão anticiclónico que contém água mediterrânica e que, portanto, costuma existir a profundidades entre 800 e 1400 m. A temperatura pode alcançar os 13°C e a salinidade 36.5, e à medida que são transportados para Oeste através do Atlântico Norte misturam-se com águas menos quentes e salgadas, passando a ser detectados como anomalias de temperatura até 4°C e salinidade até 1 unidade, anomalia essa que, num perfil de densidade, pode estender-se da superfície até aos 2000 m. Os “meddies” são gerados no bordo Sudoeste da Península Ibérica, na zona onde a topografia sofre uma acentuada viragem a seguir ao Estreito de Gibraltar, sendo portanto frequente encontrá-los na zona da Corrente dos Açores, ao longo sensivelmente dos 34°N. As suas dimensões típicas são de 40 a 150 km de diâmetro, velocidades máximas de rotação até 30 cm/s, com registo à

superfície até 10 cm/s, e período médio de vida de cerca de 1.7 anos, apesar de já terem sido observados “meddies” que duraram até 5 anos (Armi e Stommel, 1983). A Sul da Corrente dos Açores e propagando-se para Oeste, podem ainda encontrar-se “STORMs” (SubTropical Ocean Ring of Magnitude). Estes vórtices ciclónicos são caracterizados por uma camada superior (entre a camada de mistura e cerca de 500 m de profundidade) com água mais fria sobre uma camada de água subtropical. O seu diâmetro pode alcançar os 350 km e o seu tempo de vida mais de um ano (Pingree *et al.*, 1999).

Em geral, instabilidades de correntes de larga escala como são a Corrente do Golfo ou a do Atlântico Norte geram o mesmo número de ciclones e de anticiclones. No entanto, a teoria e a modelação numérica dizem-nos que a evolução natural dos turbilhões determina que os anticiclónicos duram mais do que os ciclónicos porque aqueles tendem a fundir-se, enquanto que os últimos tendem a separar-se e, portanto, também o seu tempo de vida é menor (Shoosmith *et al.*, 2005). No entanto, dadas as considerações de Alves *et al.* (2002) para uma corrente zonal com escoamento Oeste-Este, a Norte encontrar-se-ão apenas anticiclones e a Sul ciclones, facto inerente ao processo de formação dos turbilhões e devido também ao balanço de vorticidade relativa do sistema (ver secção 1.2).

## 1.2 Área em estudo

A Corrente dos Açores constitui o limite Norte do giro subtropical do Atlântico Norte (Figura 1.1). Em traços gerais, a Corrente do Golfo, que contorna para Norte a costa Este da América do Norte, ramifica-se para Nordeste como Corrente do Atlântico Norte e para Sudeste como Corrente dos Açores. Esta alimenta por sua vez a Corrente das Canárias para Sul, que vai ligar-se à Corrente Equatorial Norte que escoar para Oeste, fechando a circulação. A zona ao largo de Portugal, sendo uma região entre-giros (a Norte é ladeada pelo giro subpolar), tem uma circulação menos intensa, constituída essencialmente pela Corrente de Portugal, que escoar para Sul ao largo da Península Ibérica. No Inverno, devido a efeitos sazonais, existe ainda uma outra corrente no talude que circula para Norte contornando a costa (Peliz *et al.*, 2005).

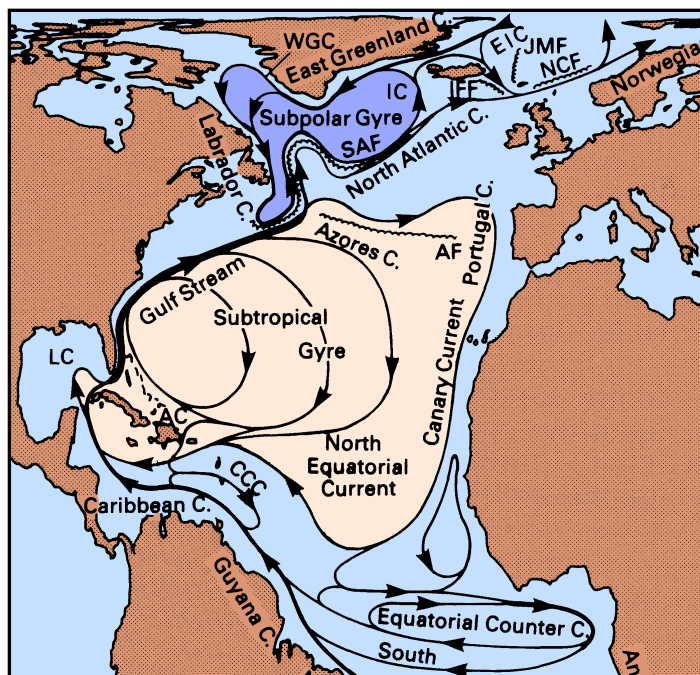
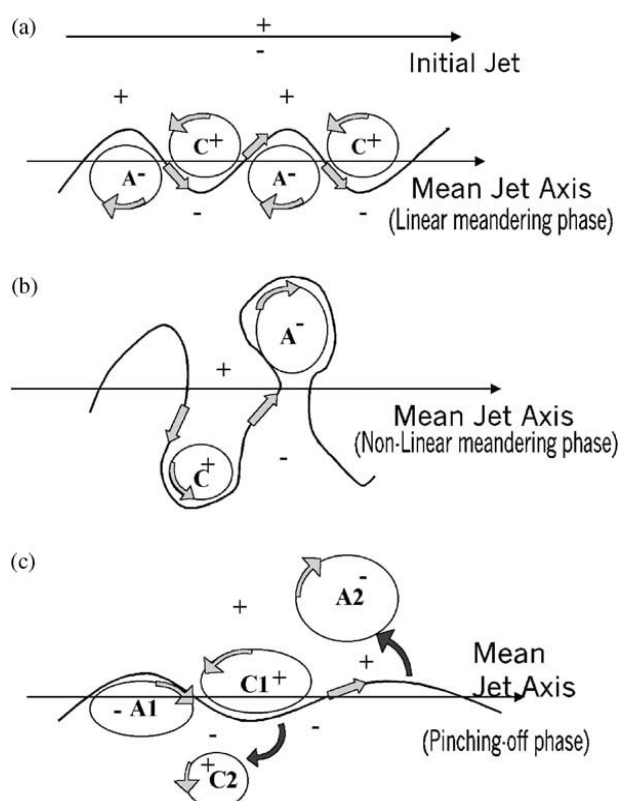


Figura 1.1 – Representação esquemática das correntes do Atlântico Norte (Tomczak e Godfrey, 2001).

A Corrente dos Açores é uma estrutura essencialmente zonal, estendendo-se sensivelmente ao longo dos 34° N, e tem associada uma frente que divide águas mais frias e menos salgadas a Norte (subpolares) e águas mais quentes e salgadas a Sul (subtropicais) (Alves *et al.*, 2002). Logo, existe um forte gradiente vertical de temperatura, provocando um “afundamento” das águas mais densas de Norte para Sul e, portanto, uma situação de baroclinicidade. Estudos climatológicos revelam que a Corrente dos Açores é uma estrutura baroclínica não muito profunda, não ultrapassando os 1000 db, com velocidades à superfície até 30-40 cm/s, diminuindo para cerca de 5 cm/s à volta de 700 db (Alves e de Verdière, 1999). Por razões de rectificação geostrófica, a Norte do eixo médio da Corrente verifica-se um escoamento recorrente para Oeste, mais frio e menos salgado, denominado na literatura por Contra-Corrente dos Açores (Onken, 1993; Cromwell *et al.*, 1996; Alves e de Verdière, 1999; Alves *et al.*, 2002). No bordo oriental da Corrente, na região do Golfo de Cádiz e na direcção da Corrente das Canárias, há recirculação devido à saída de Água Mediterrânica pelo Estreito de Gibraltar (Peliz *et al.*, 2007). Ao contrário da recirculação que está na origem da Contra-Corrente, esta é anticiclónica. Aliás, alguns estudos revelam que o escoamento de Água Mediterrânica poderá estar na origem do Sistema de Correntes dos Açores (Peliz *et al.*, 2007; Kida *et al.*, 2008), por oposição a tratar-se de uma extensão

para Este da Corrente do Golfo e do Giro Subtropical como defendido em estudos anteriores (Klein e Siedler, 1989; Maillard e Käse, 1989).

Os turbilhões associados a este sistema frontal de correntes vão ter origem baroclínica. Alves *et al.* (2002) descrevem de forma eficaz e imediata como distinguir entre meandros cuja rotação está ainda ligada ao escoamento e vórtices independentes. A representação esquemática encontra-se na Figura 1.2.



**Figura 1.2 – Representação esquemática da origem e evolução de meandros numa corrente zonal de propagação Oeste-Este. A<sup>-</sup>: anticlones (vorticidade negativa); C<sup>+</sup>: ciclones (vorticidade positiva). (a) Início da instabilidade; (b) Crescimento não-linear da amplitude das oscilações; (c) Separação das estruturas rotativas – turbilhões (A2, C2) e formação de novos meandros (A1, C1). (Alves *et al.*, 2002)**

Tratando-se de uma corrente zonal com escoamento para Este, se esta começa a tornar-se instável, adquire oscilações semelhantes às de uma onda (Figura 1.2a). Estas oscilações já têm uma rotatividade associada, anticiclónica a Sul do eixo médio e ciclónica a Norte. À medida que a instabilidade progride, a amplitude dos meandros vai crescendo (Figura 1.2b) até que acabam por se separar definitivamente do escoamento da corrente e transformar-se em estruturas rotativas independentes (Figura 1.2c) que atravessam o eixo

do jacto e cuja vorticidade relativa é de sinal contrário à do ambiente envolvente. Se por um lado os meandros vão propagar-se no mesmo sentido da corrente, os vórtices já bem definidos e independentes vão deslocar-se em sentido contrário pelas razões explicadas por Cushman-Roisin *et al.* (1990) descritas em anexo (Anexo A).

### **1.3 Objectivos do trabalho**

A principal motivação deste trabalho era a elaboração de um estudo estatístico e de caracterização de vórtices de mesoscala associados ao sistema de correntes dos Açores. Através de dados de flutuadores Lagrangeanos de superfície, procedeu-se à detecção da presença destes vórtices na área em estudo, bem como à quantificação das suas dimensões espaciais e temporais, características de rotação e translação e ainda energia cinética associada. A partir da sua distribuição geográfica, inferiu-se também acerca do tipo de vórtices em termos de origem.

Este estudo teve também como objectivo, no seguimento do trabalho de Alves *et al.* (2002), a verificação das suas observações relativamente à disparidade em número, dimensões e sentido de rotação dos vórtices encontrados a Norte e a Sul do eixo médio da Corrente dos Açores ( $\sim 34^\circ\text{N}$ ). Pretendeu-se ainda traçar comparações com resultados de outros autores no que diz respeito a estas características físicas e dinâmicas.



## 2 Estado da Arte

O Atlântico Norte tem sido alvo de variados e numerosos estudos. No que diz respeito ao global da sua circulação, destaca-se o estudo efectuado por Beckmann *et al.* (1994) sobre a variabilidade da circulação subsuperficial no Atlântico Norte Central e as suas causas, a partir de um vasto conjunto de dados: climatologia, flutuadores de superfície, altimetria e resultados de modelação. Observaram que as regiões de maior variabilidade eram as que tinham associados os escoamentos mais intensos, nomeadamente as Correntes Nor-Equatorial, Nor-Atlântica e dos Açores. Este estudo confirma ainda, através de perfis hidrográficos, que a instabilidade baroclínica é o processo dominante na génese de turbilhões e variabilidade geral desta região.

Concretamente no que diz respeito à Corrente dos Açores e ao seu sistema frontal, assinalam-se alguns trabalhos: Klein e Siedler (1989) e Maillard e Käse (1989) foram dos primeiros a identificar e caracterizar a Corrente e a determinar a sua origem. Os primeiros analisaram, por exemplo, os transportes médio e sazonal nos primeiros 800 m de profundidade no bordo Oeste e as correntes geostróficas no bordo Este, onde se verificou recirculação. Onken (1993) foi um dos primeiros a demonstrar a existência da Contra-Corrente dos Açores, um escoamento para Oeste a Norte da Corrente dos Açores. Le Traon e De Mey (1994) estudaram o campo turbulento do sistema frontal dos Açores para comprovarem a deflexão da Corrente para Sul e para Oeste. Verificaram um máximo de variabilidade da anomalia do nível do mar entre os 33 e 35°N (que corresponde à localização da maior actividade associada à corrente) e meandros meridionais, especialmente de Inverno, que, argumentam, podem ser devidos não a instabilidade mas à geração de ondas mais a Este. Cromwell *et al.* (1996) analisaram a variabilidade espácio-temporal da Corrente dos Açores, identificando um escoamento menos quente e salgado para Oeste a Norte do eixo médio da corrente (35°N), uma assinatura persistente de Inverno e que se pensa depender da topografia (mais uma observação da Contra-Corrente). Pingree *et al.* (1999) estudaram a localização e estrutura do sistema frontal a partir de medições Lagrangeanas combinadas com dados de detecção remota. Foram identificadas estruturas de grandes dimensões (até 300 km de diâmetro), tanto ciclónicas como anticiclónicas, nas franjas da região frontal, deslocando-se para Oeste e que chegam a

percorrer 1000 km. Registaram ainda, para além do escoamento para Este da Corrente dos Açores, um escoamento a Sul desta, para Oeste, associado a um gradiente de temperatura. Alves e de Verdière (1999) demonstraram que o processo dominante que define o sistema de correntes dos Açores é a instabilidade baroclínica. Demonstraram a existência da Contra-Corrente a norte do eixo médio da Corrente dos Açores, já postulada por outros autores, como consequência do processo de rectificação da turbulência geostrófica inerente ao sistema frontal. Por esta razão, argumentam, observa-se um maior número de estruturas turbulentas a Norte do que a Sul.

Dada a sua reconhecida importância e relevância no transporte global, os processos de origem e evolução, bem como a distribuição geográfica da turbulência de mesoscala e dos vórtices associados têm sido amplamente estudados ao longo dos anos. Os flutuadores Lagrangeanos têm variadas aplicações e utilidades devido às suas características, em particular no que se refere à turbulência de mesoscala. Richardson (1983) analisou velocidades e trajectórias de flutuadores para inferir sobre correntes subsuperficiais no Atlântico Norte, verificando ordens de grandeza bastante diferentes em relação às medições feitas a bordo de navios. Existem também diversos estudos sobre turbilhões específicos numa dada região, com longos períodos de vida ou que aparecem recorrentemente, como é o caso do anticiclone X91 seguido durante cerca de 10 meses por Pingree e Le Cann (1992) no Golfo da Biscaia recorrendo a dois flutuadores Argo lançados no seu centro. Estes mesmos autores (Pingree e Le Cann, 1991) seguiram um flutuador do mesmo género, durante um ano, numa zona de turbilhões na região nordeste do Atlântico, descrevendo a sua dinâmica.

Os trabalhos de maior relevância e influência na elaboração deste estudo foram trabalhos que se debruçaram sobre a região Nordeste do Atlântico Norte e em especial sobre a turbulência de mesoscala e recorrendo a técnicas Lagrangeanas.

Alves *et al.* (2002) utilizaram dados hidrográficos, Lagrangeanos e Eulerianos, bem como um modelo quase-geostrófico com assimilação de dados de altimetria, para estudar a estrutura e variabilidade do sistema de correntes dos Açores. Os seus resultados revelaram meandros e turbilhões associados a este sistema e também uma variação meridional da espessura da camada dos 17-19°C, camada essa que apresenta um contraste acentuado Norte-Sul devido ao encontro de diferentes massas de água. Essa variação, decrescente no



sentido Oeste-Este, implica por sua vez um aumento do raio de deformação de Rossby nesta direcção, o que significa que a Este há condições mais propícias à formação tanto de anticlones como de ciclones de grandes dimensões e com maior tempo de vida. Desta forma, os autores argumentam que é provável que os ciclones encontrados a Oeste não se tenham formado aí, mas antes sido advectados da parte oriental, pois seriam suficientemente pequenos para se dissiparem rapidamente. Já os anticlones podem, todavia, ter dimensões suficientes para sobreviver ao formarem-se a ocidente. Este trabalho obteve ainda, mais uma vez, confirmação da existência da Contra-Corrente dos Açores.

Shoosmith *et al.* (2005) estudaram a distribuição geográfica e as características espaço-temporais de turbilhões discretos no Atlântico Norte acima dos 40°N através da análise de dados de flutuadores RAFOS (flutuadores programados para derivar a uma profundidade pré-estabelecida). Observaram número idêntico de ciclones e anticlones, embora esse número variasse consoante a sub-região, e detectaram tanto turbilhões quase-estacionários, como em translação, cujo movimento seguia o da circulação geral da zona. Para cada sub-região descreveram, com detalhe, distribuição, movimento e características dinâmicas dos turbilhões aí presentes. Analisaram ainda a influência da batimetria e dos restantes turbilhões nas trajectórias e estudaram a relação entre o  $n^\circ$  de Rossby e a latitude, a energia cinética turbulenta, a velocidade de rotação e o diâmetro.

Le Cann *et al.* (2005) utilizaram um amplo e variado conjunto de flutuadores a várias profundidades de modo a possibilitar a identificação e caracterização de diversos tipos de turbilhões no Atlântico Nordeste, assim como do escoamento médio. Derivaram velocidades médias para as camadas 0-100 m e 100-550 m e traçaram médias zonais e meridionais das componentes dessas velocidades, bem como da energia cinética turbulenta. Observaram escoamento para Este na camada superficial a 40-42°N, com reflexão para Sul a 20-15°W, e a 45-46°N. Na camada subsuperficial o escoamento para Este era também a 45-46°N e ainda a 40-42°N, com escoamento para Oeste a 42-45°N e para Sudoeste a Sul de 40°N. Verificaram ainda que, em geral, os turbilhões se deslocavam para WSW.

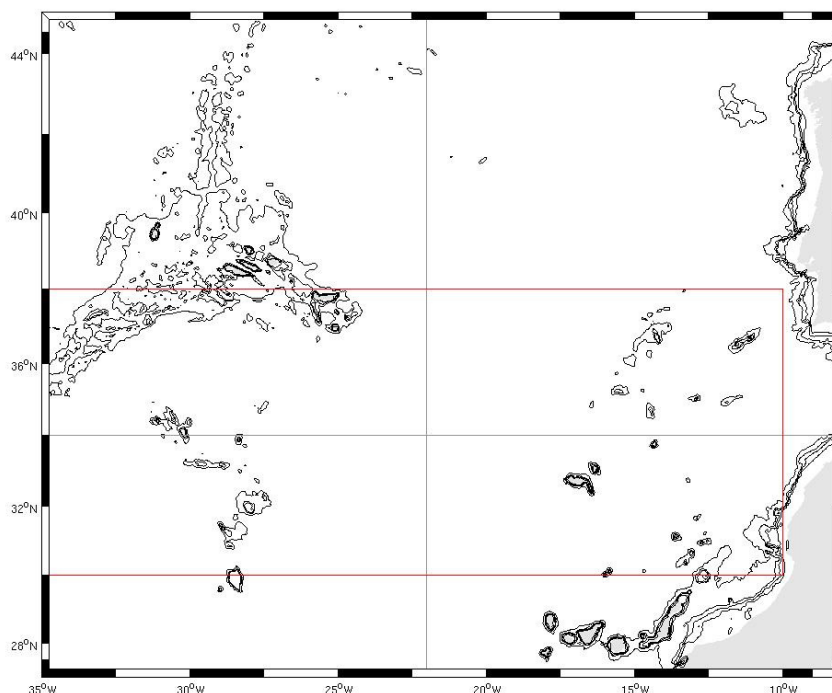


### 3 Dados e Metodologia

A região de estudo foi definida entre as latitudes 27 e 45°N e as longitudes 8 e 35°W, zona que compreende todo o arquipélago dos Açores, as ilhas Canárias e, em prol de uma mais imediata identificação geográfica, parte da Península Ibérica e Norte de África, como está representado na Figura 3.1. Para uma abordagem mais sistematizada e simplificada dos dados, a área foi dividida em 4 sub-regiões de forma a constituírem 4 quadrantes: NE, SE, SW e NW, definidos pelo paralelo 34°N, que corresponde ao eixo médio da Corrente dos Açores, e o meridiano 22°W, sensivelmente a atravessar a região ao meio. Estes quadrantes, pela sua topografia e localização, são regiões onde vão existir preferencialmente determinados tipos de turbilhões, como detalhado na secção 1.1. Na partição NW, a Norte dos Açores, a circulação está sob a influência da Crista Média Atlântica e da Corrente Nor-Atlântica, logo os turbilhões existentes serão devidos à batimetria ou associados a esta corrente. Já na partição NE, predominarão os “swoddies” (turbilhões associados a correntes do talude continental) e “meddies”, provenientes do Estreito de Gibraltar e possíveis de encontrar ao longo de toda a costa de Portugal Continental. A partição SE é propensa à formação de turbilhões de topografia devido à presença dos Arquipélagos da Madeira e das Canárias. Por fim, a partição SW poderá ser a sub-região onde se encontram mais turbilhões puramente associados à Corrente dos Açores, visto não apresentar estruturas batimétricas relevantes nem estar sob a influência directa de outros escoamentos.

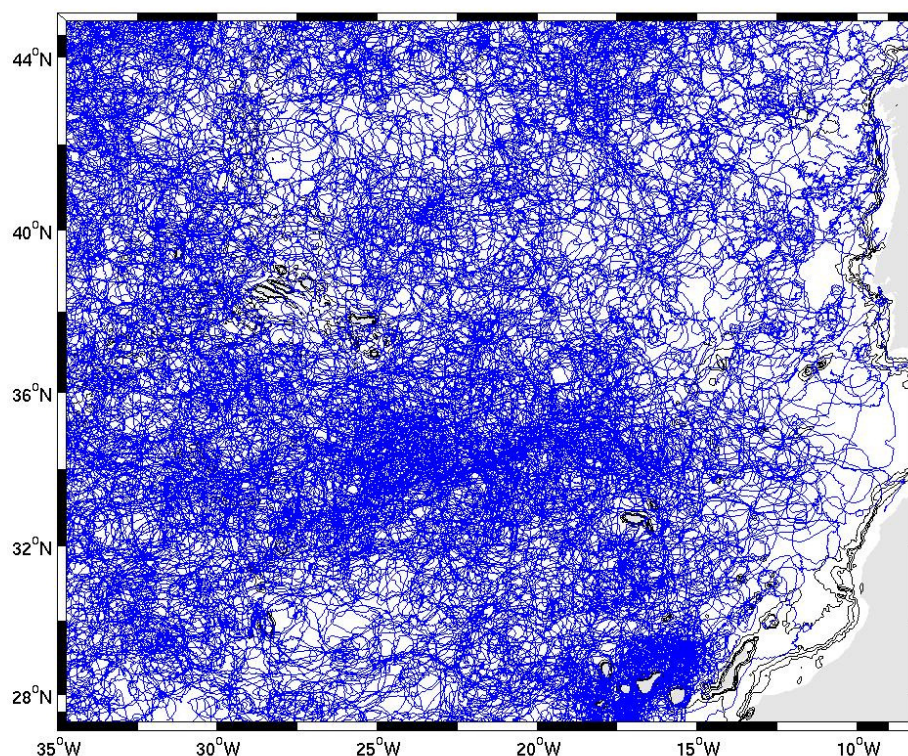
Para um estudo mais restrito às regiões circundantes do eixo médio da Corrente dos Açores, definiu-se também uma faixa em torno deste (30-38°N, 35-10°W) em relação à qual se efectuaram cálculos complementares, descritos posteriormente.

Antes de mais, observando a Figura 3.1, é de notar que as sub-regiões do Norte têm maior dimensão do que as do Sul, e a partição SE é ainda menor devido à presença de terra (um pouco da costa africana e as Ilhas Canárias). Por outro lado, a Figura 3.2 mostra uma distribuição geográfica dos flutuadores já de si heterogénea. Estas desigualdades geram um viés (“bias”) – um erro sistemático que vai afectar a estatística relacionada com a distribuição dos dados. Este facto será explorado ainda no capítulo 4.



**Figura 3.1 – Área em estudo e sub-regiões definidas para análise: a cinzento, a divisão em quadrantes; a vermelho, a faixa centrada no eixo médio da Corrente dos Açores. As linhas batimétricas correspondem às profundidades 200, 600, 1000 e 2000 m. O sombreado corresponde a terra.**

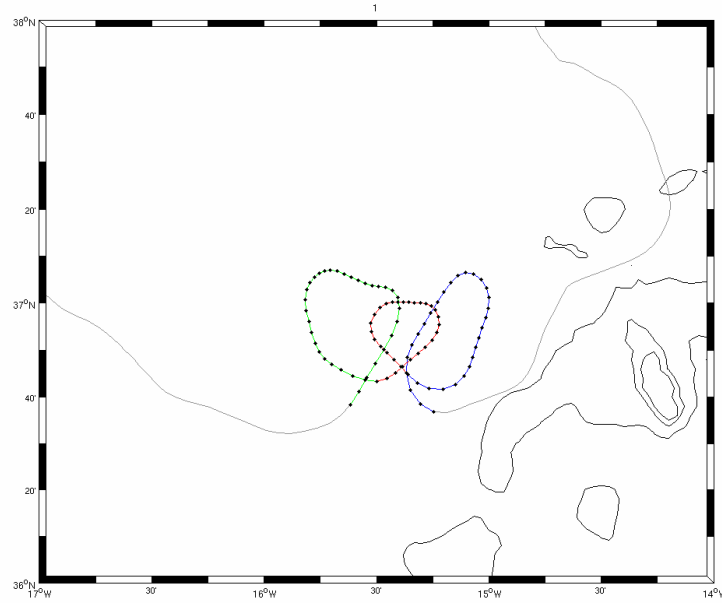
Os dados utilizados neste estudo provêm de flutuadores do Programa de Velocidades de Superfície (SVP), um programa inserido no Sistema Global de Observação do Oceano (GOOS) (Lumpkin e Pazos, 2006). Estes flutuadores derivam livremente à superfície e são localizados via satélite de modo a fornecer informação sobre circulação e temperatura subsuperficiais a uma escala temporal de  $\frac{1}{4}$  de dia. Foram analisadas as trajectórias de um total de 460 destes flutuadores presentes na área em estudo entre 1991 e 2007 no sentido de detectar movimentos de rotação, indicativos da existência de vórtices. A Figura 3.2 mostra a totalidade das suas trajectórias para ilustrar a cobertura do conjunto de dados disponíveis na área em estudo. As trajectórias são traçadas a partir de pares coordenados consecutivos e foi-lhes aplicado um filtro passa-baixo com período de corte de 33 horas no sentido de eliminar movimentos inerciais que se confundissem com movimentos de rotação. A metodologia seguida para a detecção e análise de ciclos foi baseada nas definições e nos cálculos efectuados por Shoosmith *et al.* (2005) e Le Cann *et al.* (2005). Para além da divisão em sub-regiões, as séries de ciclos foram diferenciadas em ciclónicas e anticiclónicas para a maioria da análise.



**Figura 3.2 – Cobertura dos dados: totalidade das trajectórias dos flutuadores analisados, presentes na área em estudo entre 1991 e 2007. As linhas batimétricas correspondem às profundidades 200, 600, 1000 e 2000 m. O sombreado corresponde a terra.**

Quando um flutuador é capturado por um turbilhão, efectua movimentos em torno do centro deste, e logo a sua trajectória torna-se representativa da de uma parcela de água rodando e sendo advectada pelo turbilhão. Pode ainda deduzir-se alguma informação sobre o turbilhão, tal como a ordem de grandeza e a velocidade e período de rotação. Shoosmith *et al.* (2005) determinaram que um flutuador se encontrava dentro de um turbilhão quando aquele efectuasse dois ou mais ciclos consecutivos na mesma direcção dentro de uma mesma trajectória. A esse conjunto de ciclos consecutivos denomina-se série de ciclos e a identificação destas séries, bem como do número de ciclos de cada uma, fez-se através do exame visual da trajectória de cada bóia.

A Figura 3.3 pretende esquematizar os procedimentos tanto na identificação de ciclos como no cálculo dos parâmetros apresentados e genericamente descritos na Tabela 3.1. Estes procedimentos foram baseados em Shoosmith *et al.* (2005) e visam a caracterização geral e análise estatística dos movimentos turbulentos do local.



**Figura 3.3** – Exemplo de uma série de ciclos identificada na trajectória de um flutuador. Os pontos correspondem a pares coordenados consecutivos. A batimetria está de acordo com as figuras anteriores.

**Tabela 3.1** – Parâmetros característicos calculados para cada série de ciclos.

<i>Parâmetro e unidades</i>	<i>Cálculo</i>	<i>Descrição</i>
Período médio (T) (dias)	$T = \overline{n^\circ \text{ dias} / \text{ciclo}}$	Tempo médio que a bóia leva a efectuar um ciclo em torno do centro do turbilhão.
Velocidade de rotação (swirl velocity – $V_s$ ) (cm/s)	$V_s = \ V_{rot}\ $ , em que $u_{rot} = rms(u) = \sqrt{(u - \bar{u})^2}$ $v_{rot} = rms(v) = \sqrt{(v - \bar{v})^2}$ São as componentes de $V_{rot}$	Raiz média quadrática da velocidade da bóia a partir das suas componentes. Isto é, a velocidade média corresponde à velocidade de translação e a 'perturbação' da velocidade corresponde à de rotação.
Diâmetro médio (D) (km)	$D = \frac{V_s T}{\pi}$ , que vem de $V_s = \frac{2\pi R}{T}$	Calculado através do período médio e velocidade de rotação.
Deslocamento médio ( $\Delta d$ ) (km)	$\Delta d = \Sigma (\Delta d_i)$ , $i=1, \dots, n^\circ$ de ciclos	Soma dos deslocamentos médios dos centros dos ciclos.
Velocidade de translação média ( $V_{transl}$ , $u_{med}$ , $v_{med}$ ) (cm/s)	$u_{med} = \frac{\overline{\Delta \lambda}}{T}$ , $v_{med} = \frac{\overline{\Delta \Phi}}{T}$ , $V_{transl} = \frac{\Delta d}{T}$	Deslocamentos médios sobre o período médio de cada série.
Número de Rossby (Ro) ( <i>adim</i> )	$Ro = \frac{\zeta}{f} = \frac{2\omega}{f} = \frac{2}{f} \frac{2\pi}{T} = 4 \frac{V_s}{Df}$	Quociente entre a vorticidade relativa e a vorticidade planetária.
Energia cinética turbulenta (EKE) ( $\text{cm}^2/\text{s}^2$ )	$EKE = \frac{1}{2} (u_{rot}^2 + v_{rot}^2)$	Energia cinética calculada para a velocidade de rotação, isto é, a perturbação da velocidade.

Ao observar-se cada trajectória, sempre que se identificavam dois ou mais ciclos consecutivos (três no caso da Figura 3.3), o primeiro passo foi individualizar cada ciclo recorrendo aos índices das séries de latitude e longitude que os definiam. Estando estas séries espaçadas de 6 em 6 horas, retira-se de imediato o tempo que o flutuador leva a traçar uma volta completa. O período da série de ciclos, que se considera corresponder ao do vórtice que capturou o flutuador, é a média dos períodos de todos os ciclos e a duração da série de ciclos é, evidentemente, a soma dos períodos. Os restantes parâmetros vêm no seguimento.

Para cada série de ciclos, a velocidade de rotação ou “swirl velocity” calculou-se da seguinte forma: primeiramente, obtiveram-se o período médio da série de ciclos e as séries das componentes  $u$  e  $v$  da velocidade ao longo da trajectória do flutuador. Em seguida, e com o intuito de calcular o desvio quadrático médio de cada componente da velocidade, procedeu-se ao cálculo de séries de médias corridas, cuja janela tinha a amplitude do período médio. Ao aplicar o desvio quadrático médio, obtêm-se séries de “perturbação da velocidade”, que correspondem às componentes  $u$  e  $v$  da velocidade de rotação do flutuador. Está a considerar-se que a média da velocidade num intervalo de tempo igual ao período, não sendo nula como seria se se tratasse de um círculo perfeito em que a posição inicial coincidissem com a final, corresponde à velocidade de translação do flutuador. Por fim, a “swirl velocity” toma a sua forma final como o módulo da velocidade de rotação:

$$V_s = \sqrt{u_{rot}^2 + v_{rot}^2}.$$

O cálculo do diâmetro médio vem da relação básica de  $V_s = \frac{\text{perímetro}}{\text{período}}$ . Os deslocamentos médios e velocidades de translação médias baseiam-se numa estimativa da posição do centro dos ciclos. Calculando, para cada ciclo, a média das séries de latitude e longitude, obtêm-se um centro aproximado desse ciclo, e o deslocamento vai corresponder à soma das distâncias entre os centros de ciclos consecutivos numa série. Assim, a velocidade de translação é o quociente entre essas distâncias e o período do ciclo correspondente. Por fim, o  $n^\circ$  de Rossby foi obtido a partir dos 3 parâmetros fundamentais calculados: período, diâmetro e velocidade de rotação, e a energia cinética turbulenta directamente a partir das componentes  $u$  e  $v$  desta última.

A análise destas grandezas efectuou-se de maneira directa, isto é, através de mapas de distribuição geográfica, gráficos de barras e tabelas para a distribuição de valores e gráficos de dispersão para relacionar pares de parâmetros. Para a faixa centrada na Corrente dos Açores, efectuaram-se ainda médias zonais e meridionais de algumas das grandezas e foi introduzido um outro conjunto de dados para comparação: o escoamento médio regional, que provém da climatologia obtida por Lumpkin e Garrafo (2005) a partir de um extenso conjunto de dados de flutuadores de superfície, composta por médias anuais de correntes à superfície e de temperatura da superfície do mar.

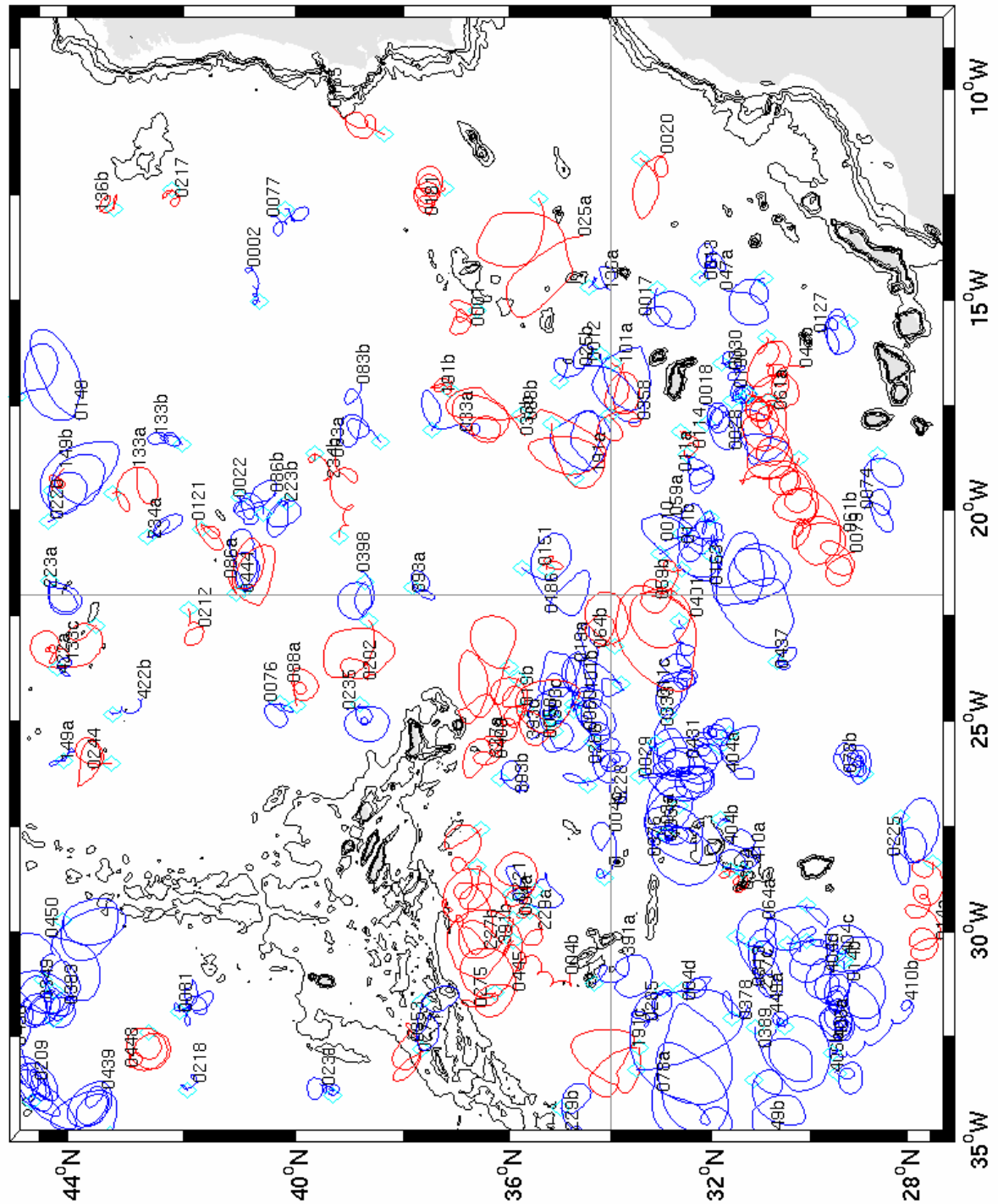


## 4 Resultados

### 4.1 Área total e sub-regiões

Na Figura 4.1. estão mapeadas todas as séries de ciclos identificadas na área em estudo a partir do conjunto de dados, numeradas para uma melhor referência (quando várias séries foram registadas por um único flutuador X estão indicadas como Xa, Xb, Xc, etc.). As trajectórias estão identificadas pelo seu sentido de rotação, azul para ciclones e vermelho para anticiclones, e estão ainda assinaladas as subdivisões efectuadas: a cinzento a divisão em quadrantes, a vermelho a faixa centrada no eixo médio da Corrente dos Açores (30-38°N). Existem alguns pontos onde houve registo de ciclos por mais do que um flutuador, o que sugere a possibilidade de vários flutuadores terem sido apanhadas por um mesmo vórtice, eventualmente uma estrutura com um período de vida mais longo ou que exista recorrentemente nessa região.

Antes de analisar mais aprofundadamente esta imagem, é oportuno referir então como se lidou com o viés mencionado anteriormente. Shoosmith *et al.* (2005) introduzem um parâmetro no seu estudo, também utilizado aqui, denominado de “probabilidade” de ocorrência de ciclos. Esta probabilidade é definida, para cada sub-região, como o número de séries de ciclos encontradas a dividir pela quantidade de registos de flutuadores nessa região, medida em “anos de dados”. Estes valores estão apresentados na Figura 4.2. Trata-se do tempo total de deriva dos flutuadores, ou seja, os tempos somados de todos os flutuadores. Esta informação é importante como complemento para a Figura 4.3, onde está representada a distribuição espacial dos registos pelas sub-regiões, distinguindo as séries de ciclos em ciclones e anticiclones. Os valores a branco são o número de ocorrências de ciclos e os valores totais encontram-se por baixo de cada gráfico em queijo, bem como a probabilidade de ocorrência correspondente em termos de sentido de rotação. A Tabela 4.1 contém ainda a distribuição temporal dos registos, incluindo distinção por sentido de rotação e valores totais.



**Figura 4.1 – Séries de ciclos identificadas, distinguidas em ciclones (azul) e anticiclones (vermelho). A cinzento, a divisão em quadrantes; a vermelho, a faixa centrada no eixo médio da Corrente dos Açores. A legenda mostra o nº de identificação da bóia respectiva. As linhas batimétricas correspondem às profundidades 200, 600, 1000 e 2000 m. O sombreado corresponde a terra.**

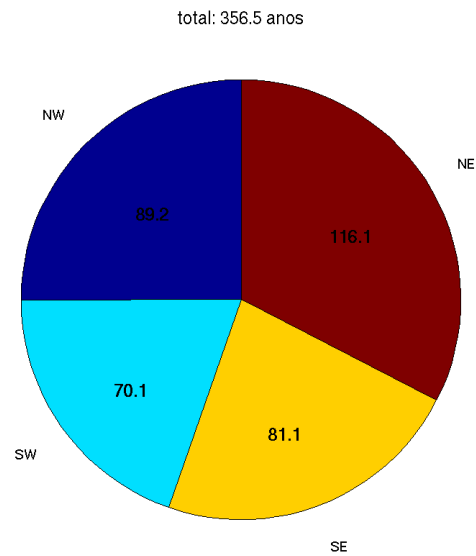


Figura 4.2 – Quantidade de registos por sub-região, em “anos de dados”.

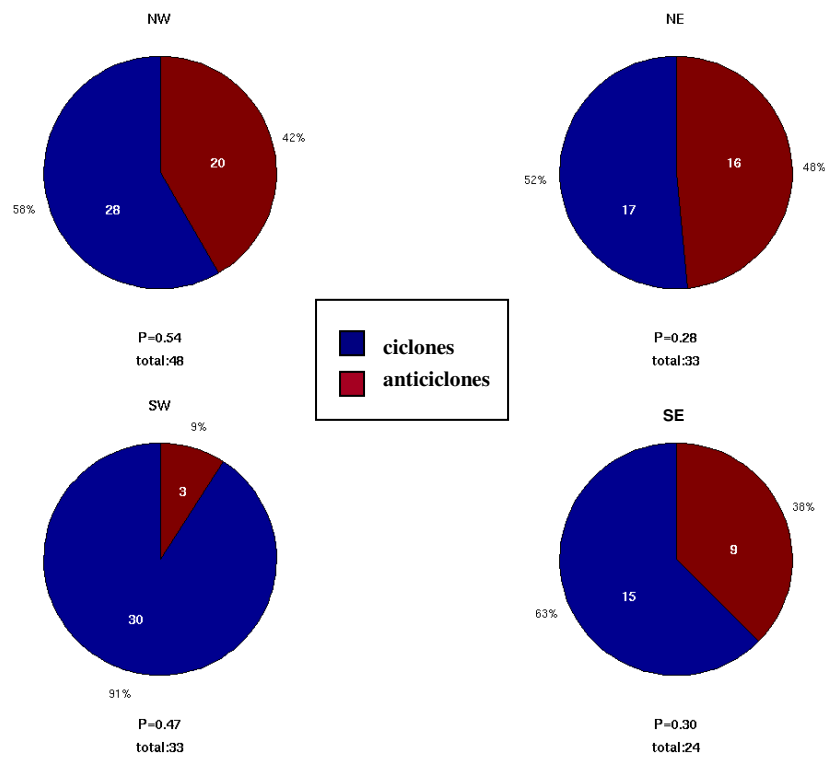


Figura 4.3 – Distribuição espacial das séries de ciclos por sub-região. As partições azuis representam ciclones, as vermelhas anticiclones e os valores correspondentes estão a branco. Em baixo, os valores totais e a probabilidade de ocorrência correspondente.

**Tabela 4.1 – Distribuição temporal das séries de ciclos, distinguida por sentido de rotação.**

<i>Período</i>	<i>Ciclones</i>	<i>Anticiclones</i>	<i>Total</i>
<b>91-92</b>	11	5	16
<b>93</b>	11	4	15
<b>94</b>	19	7	26
<b>95-97</b>	13	6	19
<b>98-00</b>	9	7	16
<b>01-04</b>	16	10	26
<b>05-07</b>	11	9	20
<b>Totais</b>	90	48	138

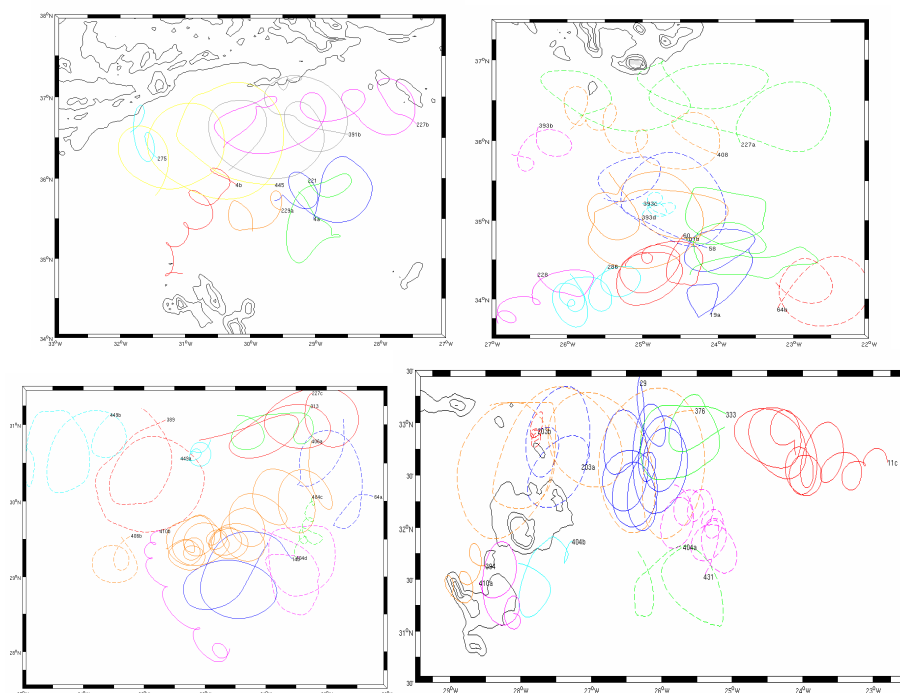
Da Figura 4.1 e da Figura 4.3 retira-se que, no global, há mais registos a Oeste do que a Este, apesar de haver um maior número de “anos de dados” a Este relativamente a Oeste (Figura 4.2). No total da área em estudo foram identificadas 138 séries de ciclos em 97 flutuadores, das quais 90 tinham rotação ciclónica e 48 rotação anticiclónica. De uma maneira geral, há maior número de registos de ciclones do que de anticiclones, qualquer que seja a sub-região ou subperíodo considerado. Nas partições a Norte, a relação do número é próxima dos 50%, mas nas partições a Sul a diferença entre ciclones e anticiclones é bem acentuada, principalmente a SW, onde apenas 3 anticiclones foram identificados contra 30 ciclones.

A distribuição na região ao largo de Portugal Continental é um pouco dispersa de registos, talvez devido à sua localização numa região inter-giro de menor intensidade de circulação. É mais provável encontrar “meddies” e “swoddies”, de menores dimensões, do que turbilhões associados ao sistema de correntes, como possivelmente os anticiclones 136b, 217, 165, 181. Este quadrante é o que apresenta o valor mais baixo de probabilidade de ocorrência (0.28) e tem mais “anos de dados”.

A partição SE, sendo a de menor área, registou o menor número de séries de ciclos e a sua probabilidade de ocorrência é também relativamente baixa. Embora o tempo de registos seja equiparável ao tempo de registos a NW, neste quadrante foi encontrado o dobro das séries do que a SE, e apresenta a probabilidade de ocorrência mais elevada. Na primeira sub-região, entre as ilhas da Madeira e Canárias, há um número considerável de séries de ciclos, algumas delas bem extensas, que foram muito provavelmente originadas

por efeito de ilha (topografia). Na segunda sub-região há alguma concentração no canto superior esquerdo, que já deve estar associada à Corrente Nor-Atlântica.

Por último, a partição SW, mesmo sendo a que possui menos anos de dados, tem uma probabilidade relativamente alta de ocorrência de ciclos: 0.47, comparável ao máximo (0.54) a NW. A região é muito densa em registos, principalmente ciclones, e muitos deles apresentam grandes dimensões, podendo tratar-se de “STORMs”. A Figura 4.4 apresenta 4 regiões densas em ciclos com cada série identificada com uma cor diferente.



**Figura 4.4 – Alguns exemplos de séries de ciclos.**

A Figura 4.5 apresenta os mínimos, médias e máximos dos parâmetros que foram calculados (cf. Tabela 3.1) para cada série de ciclos. Em cada gráfico estão dispostos os valores para cada sub-região e para a totalidade da área. A coluna da esquerda é respectiva aos ciclones, a coluna da direita aos anticiclones. A Tabela 4.2 apresenta os mesmos valores independentemente do sentido de rotação. Para uma visualização mais imediata das dimensões das séries de ciclos, em particular o raio e a deslocação, apresenta-se a Figura 4.6. O círculo representativo do perímetro dos ciclos está centrado na posição inicial da série e as sucessivas distâncias percorridas correspondem aos deslocamentos dos centros médios dos mesmos. Mais uma vez, as séries estão identificadas por sentido de rotação.



**Figura 4.5 – Mínimos, médias e máximos dos diferentes parâmetros (cf. Tabela 3.1), respectivos aos ciclones (coluna da esquerda) e aos anticiclones (coluna da direita), por sub-região (NE, SE, SW, NW) e na totalidade da área (tot).**

Tabela 4.2 – Extremos e médias dos parâmetros calculados para as séries de ciclos por sub-região e globais (cf. Tabela 3.1).

<i>sub-região</i>		<i>NE</i>	<i>SE</i>	<i>SW</i>	<i>NW</i>	<i>global</i>
<i>nº registos</i>		<i>33</i>	<i>24</i>	<i>33</i>	<i>48</i>	<i>138</i>
<i>nº ciclos</i>	<i>mín</i>	2	2	2	2	2
	<i>máx</i>	5	13	14	7	14
	<i>méd</i>	2.4	3.3	3.8	2.9	3.1
<i>duração (dias)</i>	<i>mín</i>	12.0	20.5	23.25	13.5	12.0
	<i>máx</i>	74.5	156.5	218.5	113.75	218.5
	<i>méd</i>	35.8	51.0	62.6	47.5	48.9
<i>T (dias)</i>	<i>mín</i>	4.8	9.1	8.3	5.6	4.8
	<i>máx</i>	37.5	32.4	41.5	38.2	41.5
	<i>méd</i>	15.6	16.8	18.2	16.7	16.8
<i>Vs (cm/s)</i>	<i>mín</i>	7.1	7.7	5.9	6.5	5.9
	<i>máx</i>	28.8	30.9	30.4	39.7	39.7
	<i>méd</i>	15.5	17.6	13.9	15.7	15.5
<i>D (km)</i>	<i>mín</i>	17.1	20.0	15.7	12.4	12.4
	<i>máx</i>	170.7	141.1	206.7	151.4	206.7
	<i>méd</i>	66.4	77.9	71.0	70.2	70.8
<i>Ad (km)</i>	<i>mín</i>	4.1	13.2	1.3	5.6	1.3
	<i>máx</i>	134.2	519.0	309.4	302.3	519.0
	<i>méd</i>	52.8	90.9	102.9	82.9	81.9
<i>Vt (cm/s)</i>	<i>mín</i>	0.12	0.22	0.02	0.15	0.02
	<i>máx</i>	4.63	4.04	4.13	4.01	4.63
	<i>méd</i>	1.60	1.69	1.60	1.81	1.69
<i>Ro</i>	<i>mín</i>	0.04	0.06	0.05	0.05	0.04
	<i>máx</i>	0.32	0.21	0.23	0.27	0.32
	<i>méd</i>	0.13	0.13	0.12	0.12	0.13
<i>EKE (cm<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>)</i>	<i>mín</i>	27.3	32.4	20.1	26.2	20.1
	<i>máx</i>	445.2	517.3	537.0	903.8	903.8
	<i>méd</i>	155.3	200.0	130.2	176.3	164.4

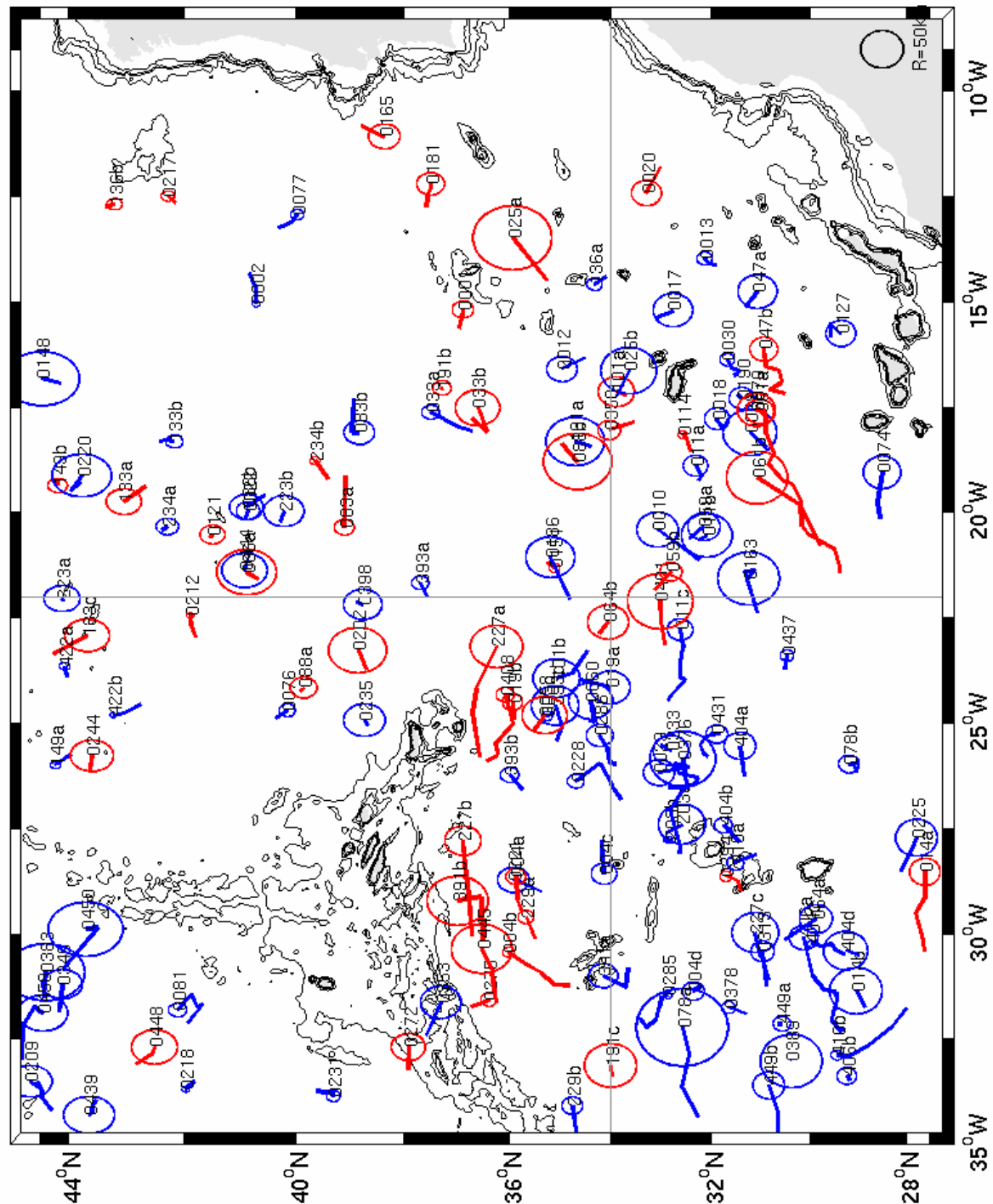


Figura 4.6 – Diâmetro e deslocamento médios de cada série de ciclos. O círculo representativo está centrado na posição inicial da série e os deslocamentos correspondem aos dos centros médios dos ciclos. As séries ciclônicas estão a azul, as anticiclônicas a vermelho. A escala de grandeza dos diâmetros está indicada no canto inferior direito. As linhas batimétricas correspondem às profundidades 2000, 1000, 600 e 200 m. O sombreado corresponde a terra.

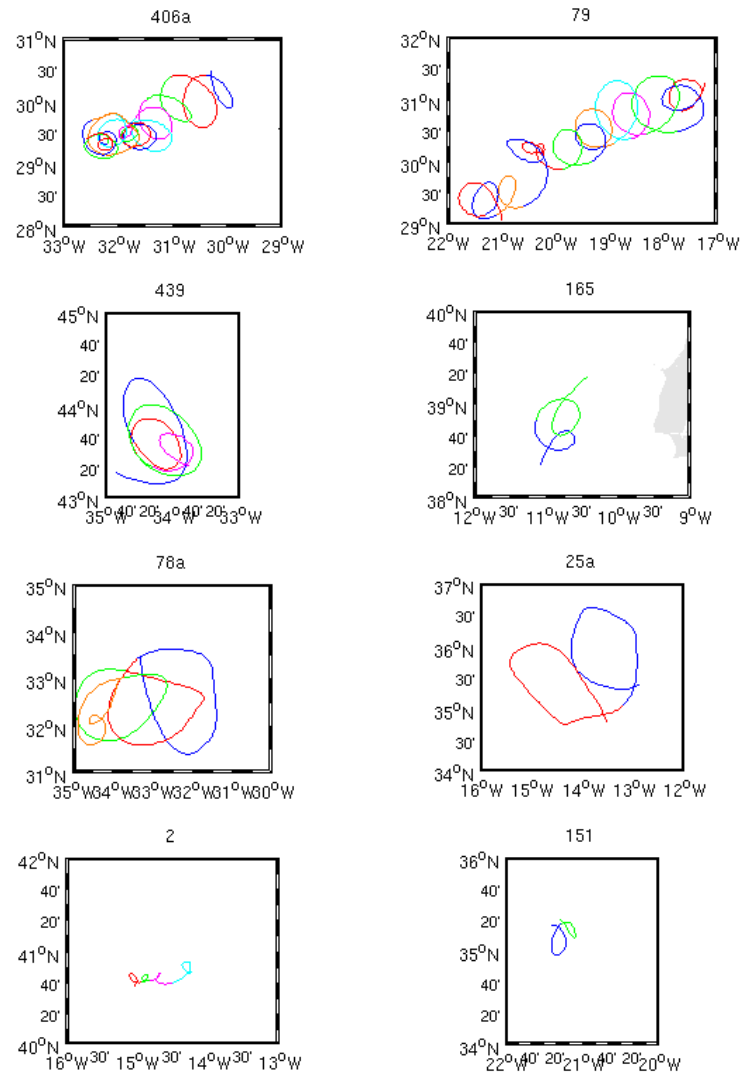


À primeira vista e em geral, a direcção predominante de deslocação dos turbilhões é para Oeste, o que é consistente com Cushman-Roisin *et al.* (1990) (ver Anexo A). No global, os valores extremos dos parâmetros correspondem a ciclones, com excepção do máximo de deslocamento médio (519.0 km percorridos pelo anticiclone 79 sensivelmente a Sul da Madeira (Figura 4.7b) contra um máximo de 309.4 km pelo ciclone 406a, com ponto de partida a 30°W,30°N e deslocamento para SW (Figura 4.7a)) e do mínimo de duração de uma série de ciclos (12 dias contra 13.5 de mínima dos ciclones).

Observando os dados por sentido de rotação, constata-se que os valores extremos para os ciclones se encontram maioritariamente na sub-região SW, enquanto que para os anticiclones os valores mais díspares são registados no quadrante NE. É curioso que seja no mesmo quadrante, em geral, que se verifiquem os dois extremos de um mesmo parâmetro. Por oposição, os quadrantes onde não há registo de mínimos nem máximos são o SE para os ciclones e o SW para os anticiclones. É relevante recordar que o quadrante SW registou 30 ciclones (o número mais elevado por sub-região) e apenas 3 anticiclones, e o menor número de ciclones foi registado a SE. Já em termos de valores médios (optou-se por juntar esta informação aos mínimos e máximos para enfatizar o facto de os valores médios estarem frequentemente bem longe dos valores medianos), os valores globais entre ciclones e anticiclones são equiparáveis. O período médio dos ciclones tende a ser superior, mas o deslocamento percorrido tende a ser inferior, bem como a velocidade de translação. Observando os valores da Tabela 4.2, verifica-se uma ligeira tendência ao quadrante NE para apresentar os valores mais baixos, se se observar as médias. Contudo, é aqui que se verificam os máximos de velocidade de translação e número de Rossby.

Olhando para cada sub-região, a NE, entre os Açores e Portugal Continental, notam-se as pequenas dimensões dos vórtices, embora alguns deles percorram distâncias consideráveis (1° ~ 100 km), curiosamente mais para Este do que para Oeste. Dentro das excepções, destaca-se a série 25a (Figura 4.7f), com o maior diâmetro (~170 km) e a que corresponde o período mais elevado (37.5 dias) dos anticiclones. Outras séries mais perto do eixo dos 34°N também já são maiores e apresentam sentidos de rotação e translação diversos. Neste quadrante, registam-se a velocidade máxima de rotação de um anticiclone, 28.8 cm/s para a série 165 (Figura 4.7d), e, como referido anteriormente e agora discriminado, os valores máximos do nº de Rossby, 0.32 para o ciclone 2 (o de menor

período médio: 4.6 dias) (Figura 4.7g), e 0.28 para o anticiclone 151 (Figura 4.7h) e os valores máximos de velocidade de translação ( $>4\text{cm/s}$ ).



**Figura 4.7 – Trajectórias das séries respectivas aos máximos de (a,b) duração e deslocamento; (c,d) velocidade de rotação; (e,f) diâmetro; (g,h) n° de Rossby.**  
A coluna da esquerda diz respeito aos ciclones e a da direita aos anticiclones.

No quadrante SE, as observações mais notáveis são as longas distâncias percorridas por dois anticiclones entre a Madeira e as Canárias: 61b, ~236 km, e o já mencionado anticiclone 79, que percorreu a maior distância e que durou mais tempo: 156.5 dias, isto é, cerca de 5 meses, em 13 ciclos (Figura 4.7b).

A Sudoeste encontra-se o ciclone de maior diâmetro, 78a (~207 km), com um deslocamento também substancial, ~247 km (Figura 4.7e). Os ciclos de menores dimensões nas suas franjas sugerem que outros flutuadores poderão ter sido apanhados nessa mesma circulação (285, 4d, 378). Neste quadrante, destacam-se longas trajectórias de vários ciclones, concretamente da série 410b, com um diâmetro muito pequeno mas um deslocamento de ~215 km para SE, 11c com ~208 km, 406a com ~309 km (o máximo registado e a que corresponde a duração máxima: 218.5 dias, isto é, cerca de 7 meses, em 14 ciclos) e 376 com ~262 km (ver Figura 4.4 para uma melhor visualização). Esta última série está também rodeada por outras séries ciclónicas, como já mencionado na análise da Figura 4.1. A série ciclónica de período médio mais elevado foi a 389, com 41.5 dias.

Na partição NW, as estruturas mais relevantes são os anticiclones a Sul dos Açores, com grandes deslocamentos (~145 a ~302 km) e diâmetros também elevados (~78 a ~131 km). Aqui, regista-se a velocidade de rotação mais elevada: 39.7 cm/s para o ciclone 439 e respectivamente a EKE máxima:  $904 \text{ cm}^2/\text{s}^2$  (Figura 4.7c).

Entre diferentes sub-regiões, as médias dos diferentes parâmetros são bastante similares salvo poucas excepções. O diâmetro médio, por exemplo, está entre 65 e 80 km, ao passo que Paillet (1999), em sub-regiões próximas destas, encontrou diâmetros médios distintos. A NW, já sob a influência da Corrente Nor-Atlântica, os valores eram bem superiores aos registados a NE. A Sul, a média rondava os 100 km. O mesmo autor encontrou velocidades de 10 a 30 cm/s e nº de Rossby inferiores a 0.1. Numa região mais a Norte da área em estudo, Le Cann *et al.* (2005) identificaram vórtices deslocando-se para WSW, tendo como máximos 185/313 dias de duração, 23/28 cm/s de velocidade de rotação, 74/132 km de diâmetro e 0.42/0.34 de nº de Rossby, respectivamente para ciclones/anticiclones. Os valores para os anticiclones tendem a ser algo superiores, contrariamente a este estudo. A Sul da Corrente, Pingree *et al.* (1999) registaram flutuadores a deslocarem-se por ~200 dias e ~500 km com um STORM de diâmetro superior a 160 km e velocidades de rotação superiores a 40 cm/s.

As figuras seguintes mostram relações entre parâmetros através de gráficos de dispersão. A Figura 4.8 apresenta o raio em função da velocidade de rotação distinguindo as séries por sentido de rotação e a Figura 4.9 o mesmo mas com divisão em quadrantes. As restantes relacionam o nº de Rossby com latitude (Figura 4.10), EKE (Figura 4.11), raio

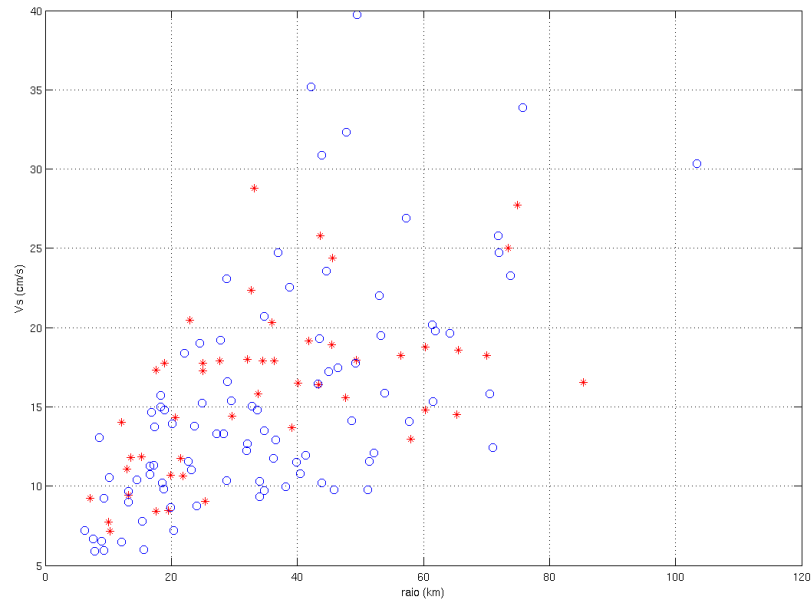
(Figura 4.12 e Figura 4.13), velocidade de rotação (Figura 4.14) e velocidade de translação (Figura 4.15).

Apesar de, em geral, a velocidade de rotação aumentar com o raio (Figura 4.8), algumas das maiores velocidades correspondem a raios da ordem de 40 a 70 km e não aos máximos. A maior concentração de ocorrências situa-se no intervalo de valores 5-60 km e 5-25 cm/s. Observando por sub-região (Figura 4.9), constata-se que a relação mais linear das duas grandezas ocorre a SW, a região que apresenta a maioria dos máximos dos parâmetros. Os valores que sobressaem mais são os do quadrante NW, com velocidades entre os 30 e 40 cm/s, que correspondem às séries de ciclos mais a Norte, possivelmente relacionadas com a Corrente Nor-Atlântica. Há mais duas séries com velocidade superior a 30 cm/s: o maior ciclone (78a a SW) e um ciclone a SE, possivelmente um turbilhão originado por efeito de ilha: 74 (Oeste das Canárias). Para uma região mais a Norte, Le Cann et al. (2005) encontraram a mesma relação entre a velocidade de rotação e o raio.

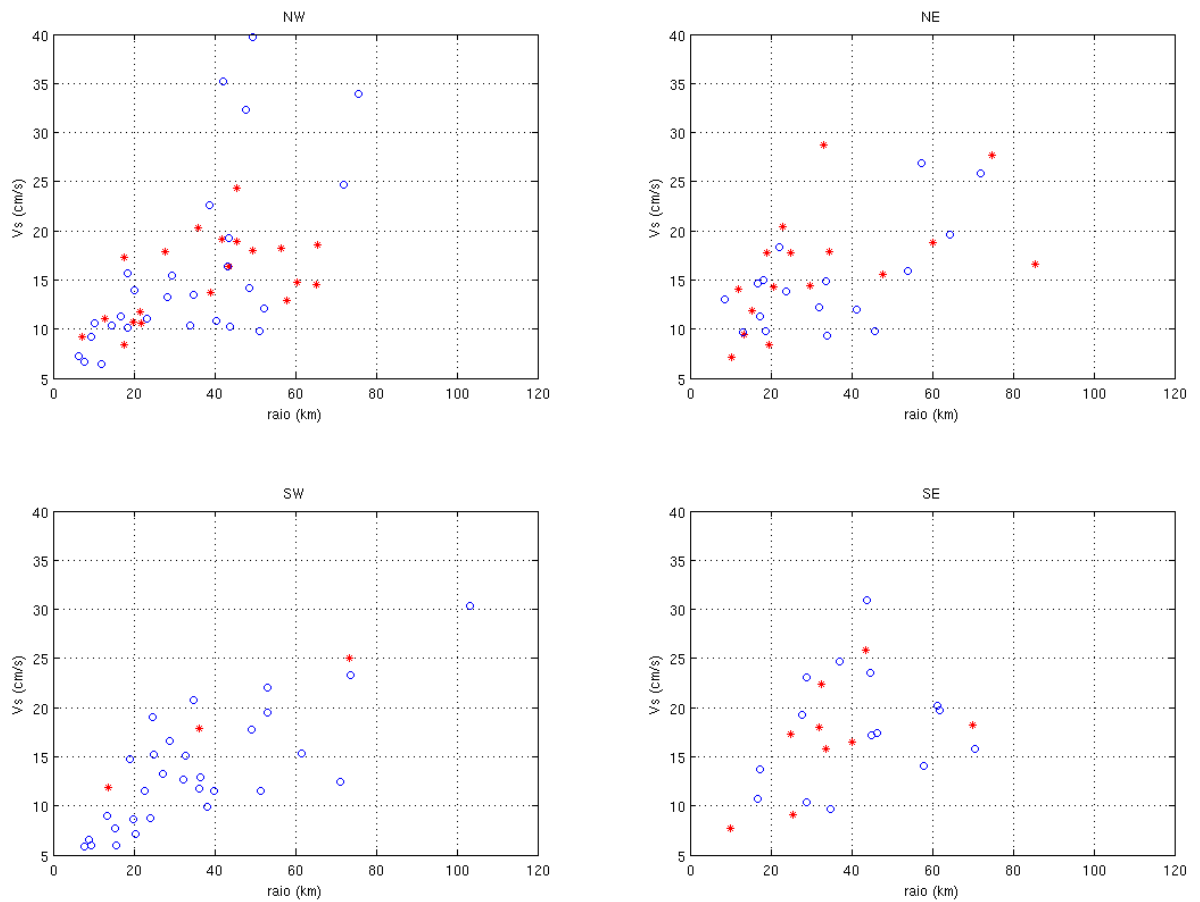
No que diz respeito à relação entre o nº de Rossby e a latitude (Figura 4.10), a maioria dos valores encontra-se entre 0.05 e 0.2 e distribuem-se ao longo de todas as latitudes. Apenas 3 séries têm nº de Rossby superior a 0.25: 2, 151 (a NE) e 212 (a NW). A divisão das séries por quadrante não contribui com nova informação, pelo que os gráficos não se apresentam.

Em relação à distribuição do nº de Rossby em função da EKE (Figura 4.11), verifica-se uma concentração de registos abaixo de  $200 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ . Destacam-se as séries ciclónicas cuja EKE ultrapassa os  $500 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ , que correspondem aos máximos de velocidade de rotação. É ainda de salientar o facto de os anticiclones atingirem apenas os  $450 \text{ cm}^2/\text{s}^2$  e de as séries de nº de Rossby superior a 0.25 terem EKE inferior a  $150 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ .

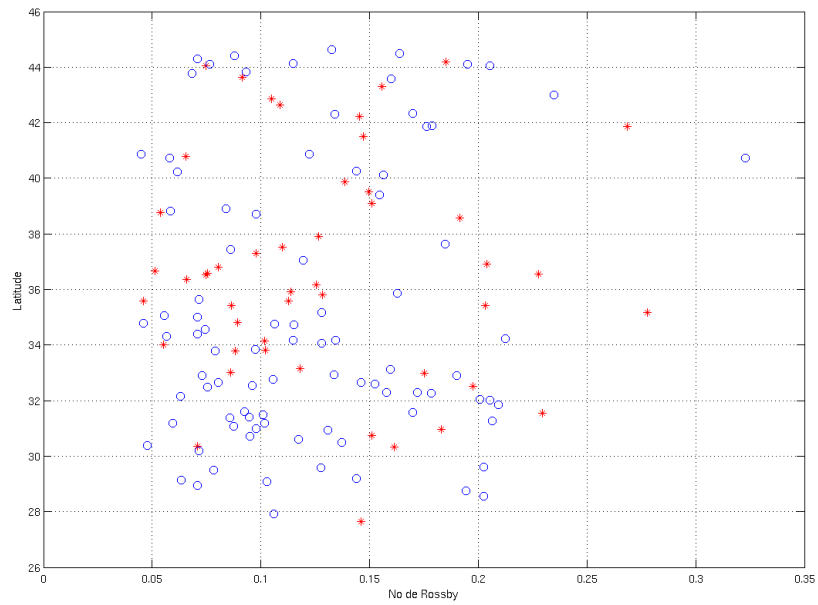
Na Figura 4.12 e na Figura 4.13 verifica-se claramente que o nº de Rossby diminui com o raio, o que mais uma vez indica que os ciclos de maiores diâmetros são os que têm maiores períodos, ou seja, os que rodam mais lentamente. De facto, um nº de Rossby elevado implica predominância das forças inerciais sobre as rotacionais, ou seja, a força de Coriolis está maioritariamente em equilíbrio geostrófico e pouco disponível para fomentar a rotação do fluido, que é o que acontece nos vórtices de menores dimensões, como ilustrado pelas 3 séries de ciclos de raio menor do que 15 km e com nº de Rossby maior do que 0.25, as já referidas na análise do nº de Rossby em função da latitude.



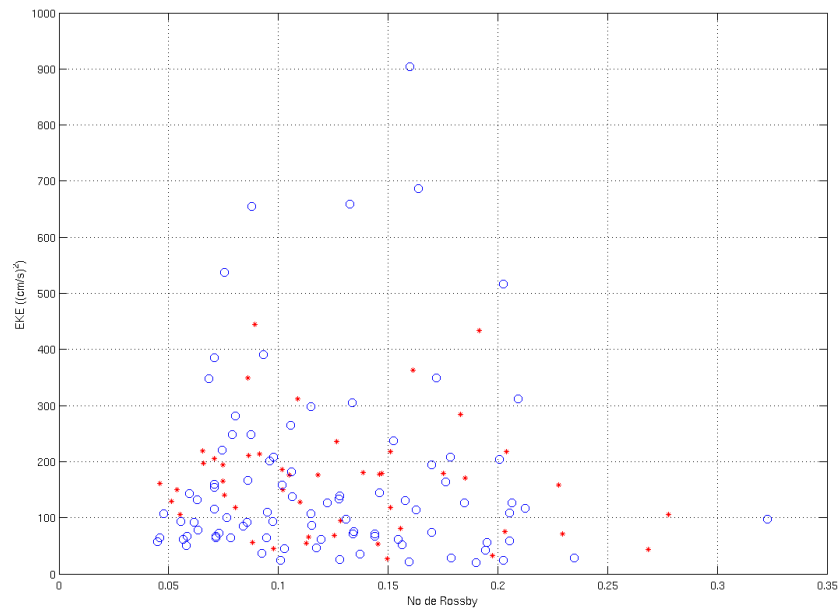
**Figura 4.8 – Representação do raio (km) em função da velocidade de rotação (cm/s) de cada série de ciclos distinguidas por direcção de rotação (círculos azuis: ciclones; asteriscos vermelhos: anticiclones).**



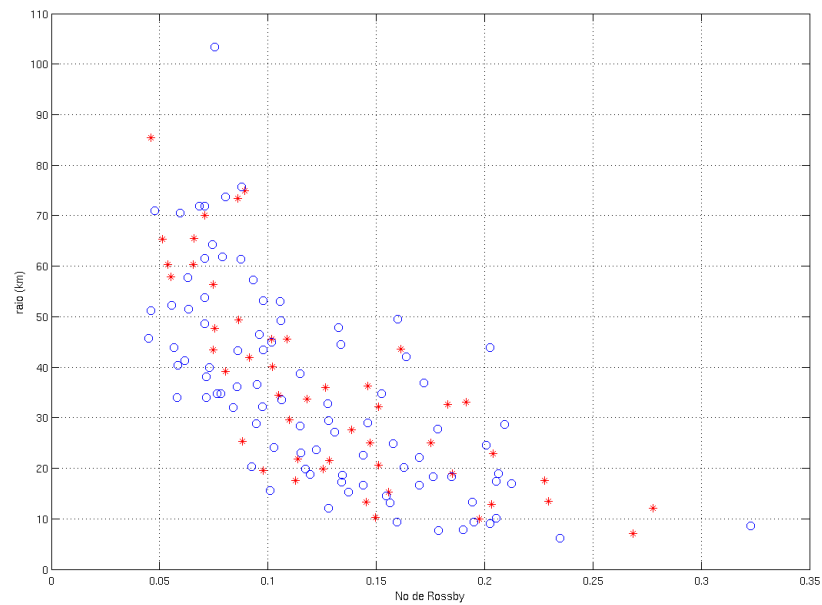
**Figura 4.9 – O mesmo do que a Figura 4.8, mas valores divididos por sub-região: NE, SE, SW e NW.**



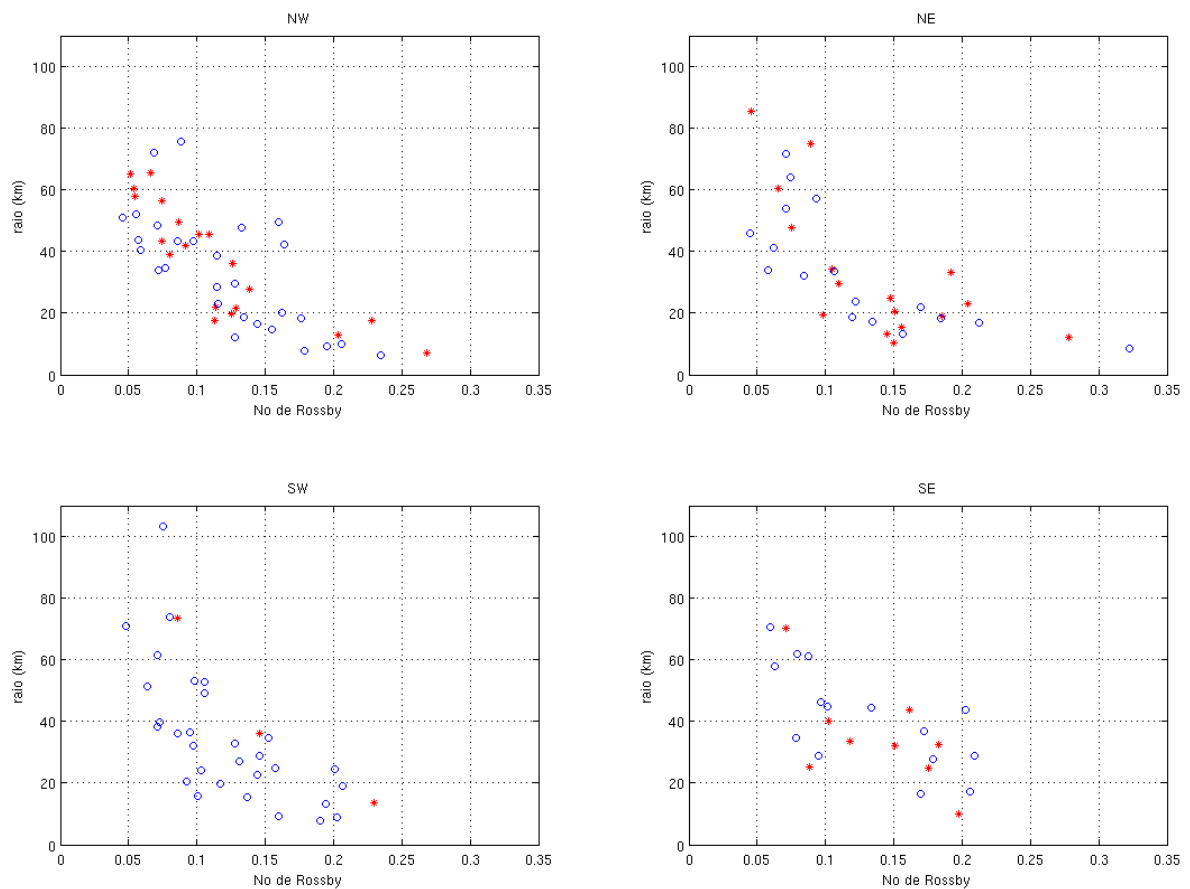
**Figura 4.10 – Representação do nº de Rossby em função da latitude (°N) de cada série de ciclos distinguidas por sentido de rotação (círculos azuis: ciclones; asteriscos vermelhos: anticiclones).**



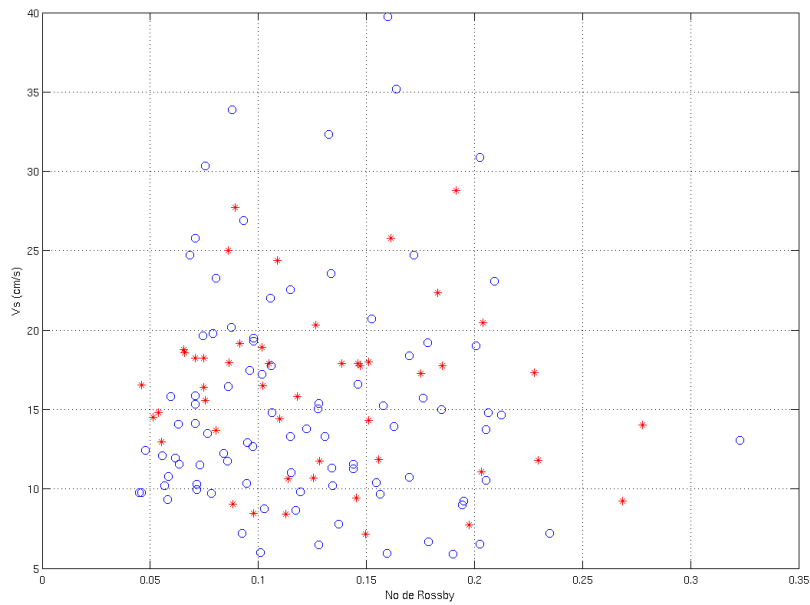
**Figura 4.11 – Representação do nº de Rossby em função da EKE ( $\text{cm}^2/\text{s}^2$ ) de cada série de ciclos distinguidas por sentido de rotação (círculos azuis: ciclones; asteriscos vermelhos: anticiclones).**



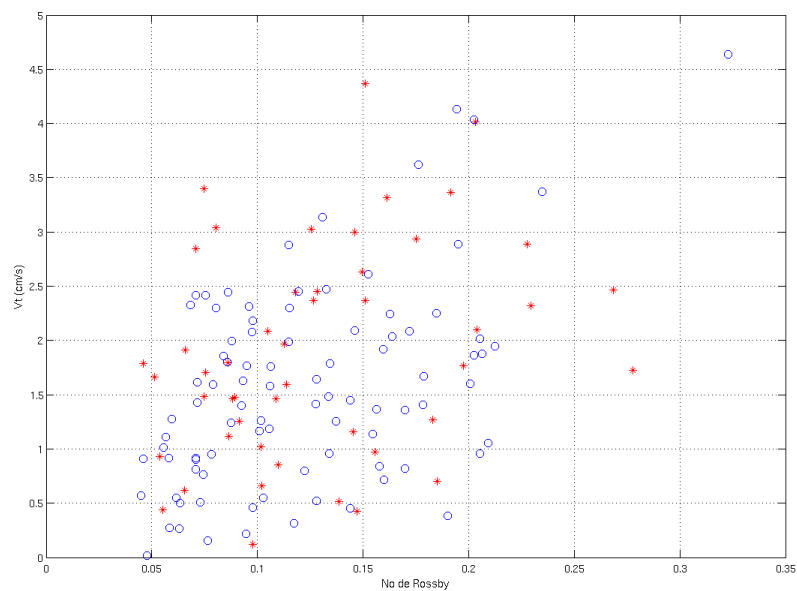
**Figura 4.12 – Representação do nº de Rossby em função do raio (km) de cada série de ciclos distinguidas por sentido de rotação (círculos azuis: ciclones; asteriscos vermelhos: anticiclones).**



**Figura 4.13 – O mesmo do que a Figura 4.12, mas valores divididos por sub-região: NE, SE, SW e NW.**



**Figura 4.14 – Representação do nº de Rossby em função da velocidade de rotação (cm/s) de cada série de ciclos distinguidas por sentido de rotação (círculos azuis: ciclones; asteriscos vermelhos: anticiclones).**



**Figura 4.15 – Representação do nº de Rossby em função da velocidade de translação (cm/s) de cada série de ciclos distinguidas por sentido de rotação (círculos azuis: ciclones; asteriscos vermelhos: anticiclones).**

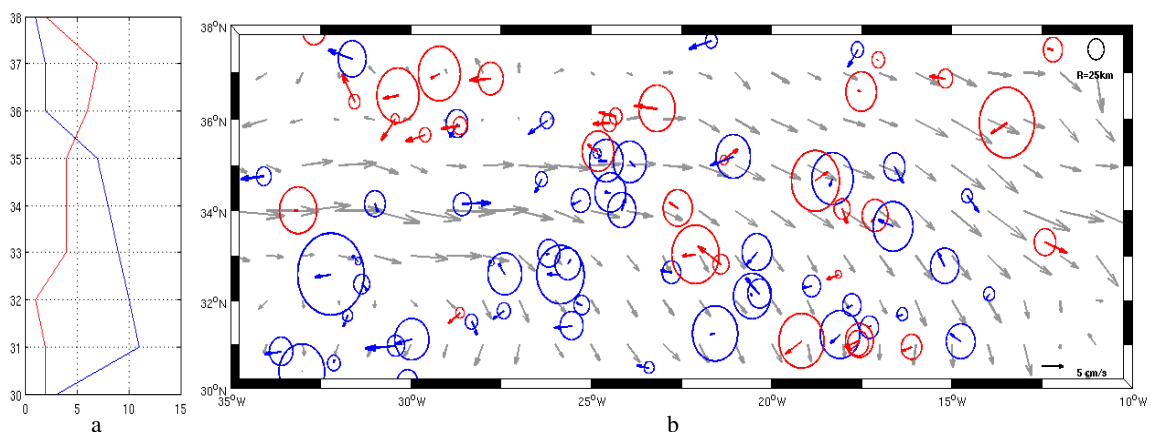


Por último, em relação ao  $n^\circ$  de Rossby em função da velocidade de rotação (Figura 4.14) e de translação (Figura 4.15), há maior evidência de a última aumentar com o  $n^\circ$  de Rossby do que a primeira. Ao intervalo de  $n^\circ$  de Rossby de maior concentração de dados (0.05-0.2) corresponde um intervalo de 0-20 cm/s para a velocidade de rotação e 0-2.5 cm/s para a velocidade de translação. As maiores velocidades de rotação apresentam este mesmo intervalo de valores de  $n^\circ$  de Rossby, enquanto que às maiores velocidades de translação correspondem valores entre 0.15 e 0.35. O máximo ( $> 4.5$  cm/s) coincide com o máximo de  $n^\circ$  de Rossby (série 2).

## 4.2 Corrente dos Açores

Como referido na introdução, o Sistema de Correntes dos Açores compõe-se de uma corrente principal para Este, sensivelmente zonal ao longo do paralelo  $34^\circ\text{N}$ , e de outras estruturas demonstradas por vários autores, das quais se destacam a deflexão do jacto para Sul no bordo Este e uma Contra-Corrente a Norte de  $34^\circ\text{N}$  escoando para Oeste. Como tal, faz sentido focar o estudo numa faixa mais restrita em torno do eixo médio.

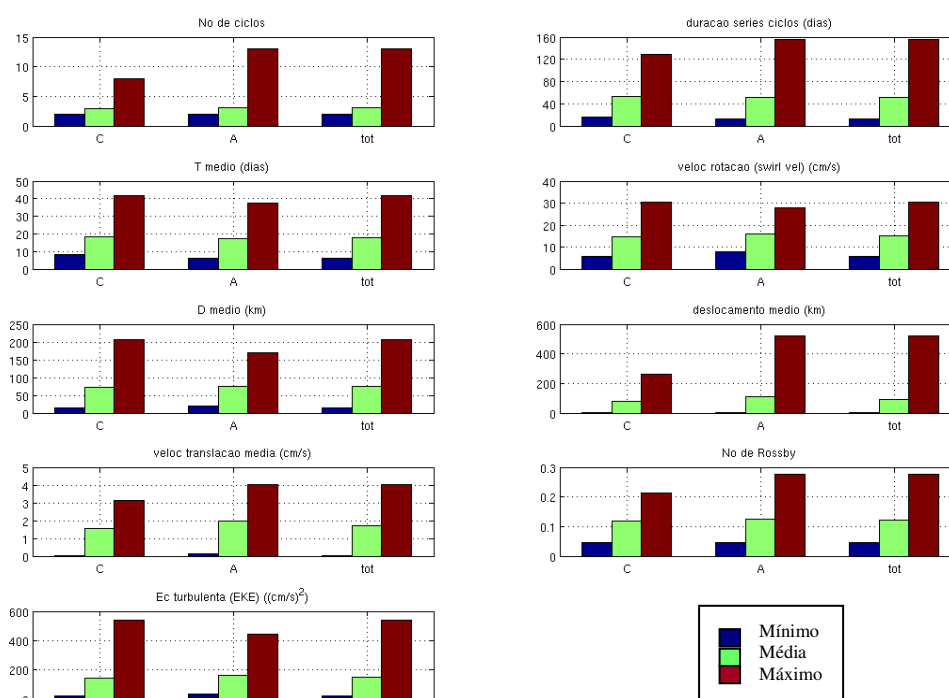
Na Figura 4.16b estão representados o diâmetro e velocidade de translação médios de cada série de ciclos, diferenciadas por sentido de rotação, e ainda o escoamento médio base (a cinzento). Na Figura 4.16a está representado o  $n^\circ$  de ciclones e o  $n^\circ$  de anticiclones em função da latitude na mesma faixa.



**Figura 4.16 – (a)  $N^\circ$  de ciclones (azul) e  $n^\circ$  de anticiclones (vermelho) em função da latitude. (b) Representação do diâmetro e velocidade de translação médios de cada série de ciclos (séries ciclónicas a azul, anticiclónicas a vermelho) e escoamento médio base (a cinzento). Os círculos representativos dos diâmetros e os vectores de velocidade estão centrados nas posições iniciais de cada série. A escala dos diâmetros está indicada no canto superior direito e a dos vectores no canto inferior direito.**

À primeira vista, não se pode dizer que os flutuadores sigam preferencialmente o escoamento médio. Como já se tinha verificado na Figura 4.1, as séries de ciclos tendem a deslocar-se para Oeste, ou seja, contra o escoamento base. Já o deslocamento para Sul dos anticiclones e para Norte dos ciclones também previsto por Cushman-Roisin *et al.* (1990) (ver Anexo A) não é tão claro. A cerca de 16-19°W (Figura 4.16b), região de deflexão da Corrente para Sul, há bastante mistura de ciclones e anticiclones, já que o eixo médio do jacto principal deixa de ser puramente zonal e passa por aqui. Tendo em conta esta observação, traçou-se a distribuição de ciclones e anticiclones em latitude (Figura 4.16a), onde de facto se verifica um maior nº de anticiclones a Norte diminuindo para Sul e vice-versa para os ciclones. Esta observação está de acordo com a ideia postulada por Alves *et al.* (2002).

A Figura 4.17 é semelhante à Figura 4.5 mas refere-se apenas a esta região.



**Figura 4.17 – Mínimos, médias e máximos dos diferentes parâmetros (cf. Tabela 3.1) para a faixa da Corrente dos Açores (30-38°N), respectivos aos ciclones (C), aos anticiclones (A) e no global (tot).**

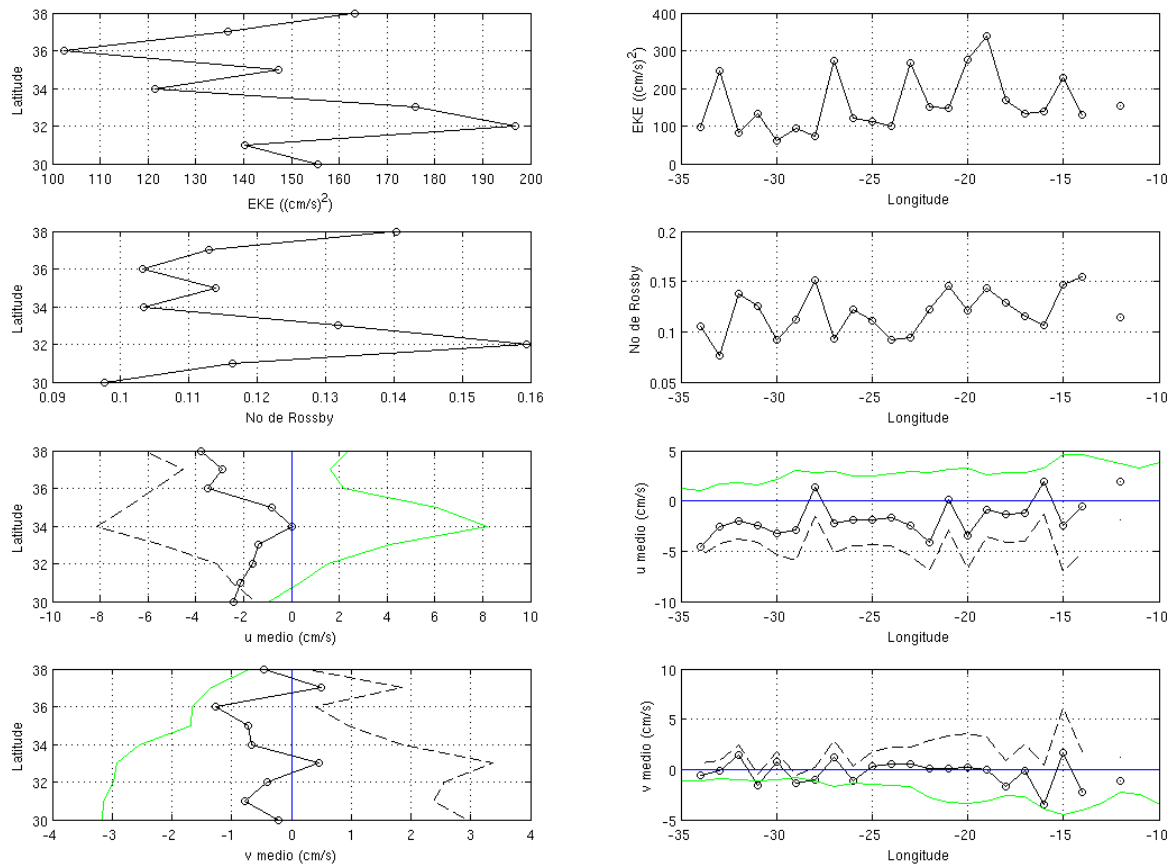
Em termos de valores dos diversos parâmetros calculados, os máximos observados são algo mais moderados nesta faixa mais restrita. Os máximos de deslocamento, período e diâmetro coincidem com os máximos da totalidade da região (cf. Figura 4.5). O máximo de

duração de uma série fica-se pelos 156.5 dias para anticiclones (série 79 a SW da Madeira, a de maior deslocamento) e 128.75 dias para ciclones (série 163 a Oeste da Madeira). A velocidade de rotação máxima é de 30.4 cm/s (série 78a, o maior ciclone) e a da velocidade de translação não ultrapassa os 4 cm/s (série 4b, a 35°N,30°W). O nº de Rossby máximo coincide com o máximo geral dos anticiclones (0.28) e a EKE fica-se pelos 537 cm<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>.

Para avaliar algumas propriedades dinâmicas das séries de ciclos em latitude e longitude, foram calculadas médias zonais e meridionais da energia cinética turbulenta, nº de Rossby e das duas componentes da velocidade de translação. Com o intuito de estimar quanto desta velocidade de translação era devido ao escoamento base e quanto devido ao próprio movimento de rotação dos flutuadores, foram representadas não só as séries de velocidade originais, medidas a partir dos registos, mas também o escoamento médio e a diferença entre estas duas grandezas. Ou seja, a diferença ilustra a velocidade média de translação caso não houvesse escoamento base para Este. As médias zonais estão representadas em função da latitude e as meridionais em função da longitude (Figura 4.18) e estas médias foram ainda representadas por ciclones e anticiclones (Figura 4.19).

É relevante relembrar o viés que estes dados sofrem; numa determinada banda de latitude ou longitude, pode existir apenas uma ou duas séries de ciclos, pelo que o resultado destas médias nem sempre é ilustrativo do que se passa na região. De uma maneira geral, as médias meridionais não oferecem informação acerca de tendências ou padrões de comportamento em longitude, antes são o resultado de uma distribuição meridionalmente menos homogénea das séries de ciclos e reflectem valores pontuais, evidenciados pelos picos nos resultados, e portanto menos representativos.

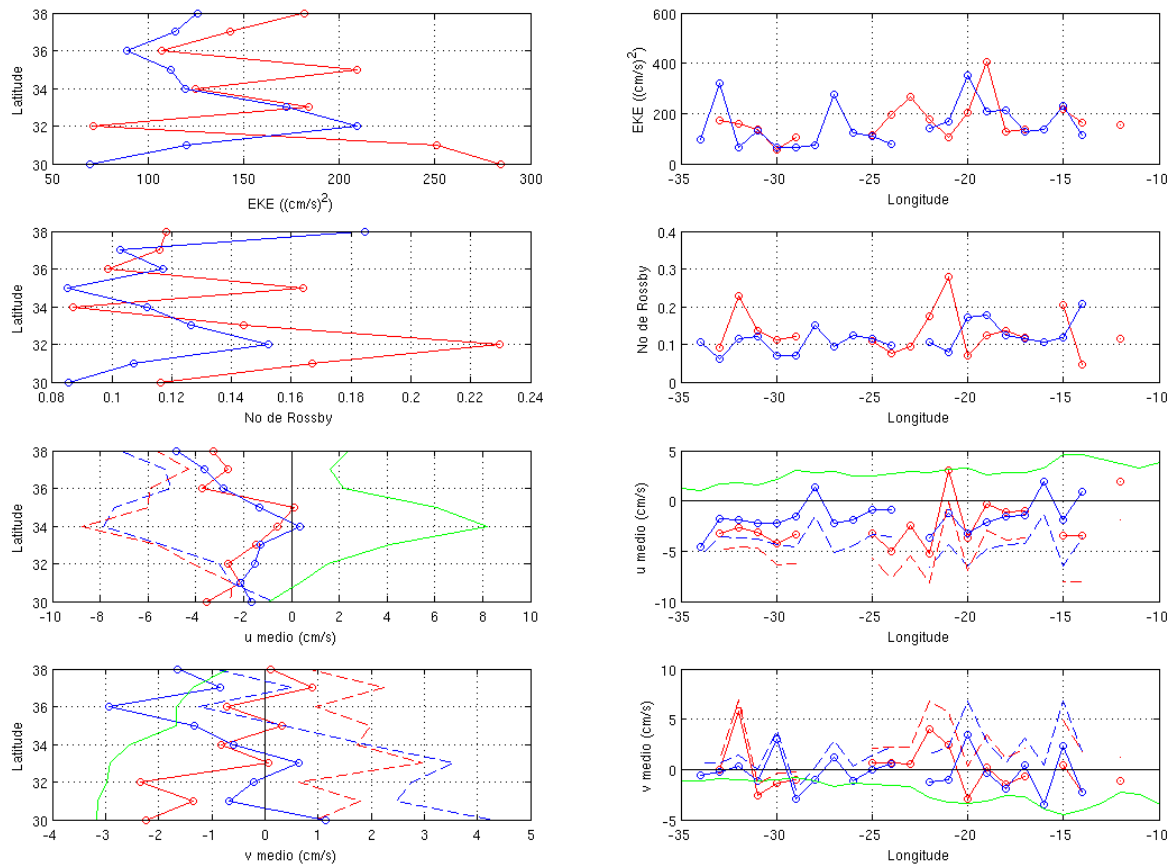
Analisando a distribuição de EKE, verifica-se um máximo a 32°N e um mínimo a 36°N, respectivamente a Sul e a Norte do eixo médio da corrente dos Açores. Olhando para a Figura 4.19, constata-se que este máximo é essencialmente devido a ciclones, enquanto que o máximo relativo aos 35°N é devido a anticiclones e para o mínimo ambas as circulações apresentam valores próximos do valor médio da Figura 4.18. Já as médias meridionais apresentam vários picos, curiosamente a longitudes de menor concentração de ciclos (33, 27, 23 e 19°W). Estes picos são à vez respectivos a ciclones ou anticiclones e o último (o máximo) é coincidente para os dois tipos de rotação (Figura 4.19).



**Figura 4.18** – Médias zonais em função da latitude (coluna da esquerda) e médias meridionais em função da longitude (coluna da direita) de: (a) EKE; (b) N° de Rossby; (c)  $u$  médio; (d)  $v$  médio. As séries a traço contínuo negro com círculos são as calculadas, a verde está representado o escoamento médio (Lumpkin e Garrafo, 2005) e a tracejado está representada a diferença entre os dois. A linha azul marca o zero.

Em traços gerais, a distribuição zonal do n° de Rossby é bastante semelhante à de EKE, apresentando um máximo e um mínimo sensivelmente às mesmas latitudes. Distinguindo por sentido de rotação, observa-se uma distribuição meridional mais invariante para os ciclones, enquanto que os anticiclones apresentam dois picos, a 32°W e a 21°W, onde se encontram vórtices de pequenas dimensões.

No que diz respeito às velocidades, o escoamento médio (a verde) reflecte muito bem a distribuição de vectores representada na Figura 4.16. A componente zonal tem máximo a 34°N (eixo médio do jacto principal, média de 8 cm/s), sempre positiva longitudinalmente, intensificando-se para Este. A componente meridional em média é sempre negativa, isto é, para Sul, tanto em latitude como em longitude. Em módulo, intensifica-se para Sul e para Este (máximo aproximadamente de 5 cm/s).



**Figura 4.19 – O mesmo do que a Figura 4.18, mas diferenciando os registos em ciclones (azul) e anticiclones (vermelho). Aqui, a linha do zero está a negro.**

Relativamente às velocidades dos flutuadores e tendo em conta o resultado quando se retira o escoamento médio, verifica-se que a translação das séries de ciclos tem uma direcção preferencial contrária à deste escoamento base, como já era possível supor a partir da Figura 4.16. As médias de cada componente, tanto zonais como meridionais, têm na sua maioria sinal contrário. Confirma-se que a componente  $u$  é sempre para Oeste, com um máximo em latitude também a 34°N (para ciclones e anticiclones, sendo digno de nota o facto de a esta latitude se terem registado valores próximos de zero, devido a várias séries que se deslocam para Este, tal como observado na Figura 4.16). Em longitude,  $u$  apresenta máximos entre 20-22°W e a 15°W, essencialmente referentes a anticiclones; o mínimo próximo de zero a 21°W deve-se à quase anulação das velocidades dos únicos dois anticiclones existentes nesta faixa.

Já a componente  $v$ , apesar de no global (Figura 4.18) ser positiva, isto é, para Norte, quando se olha para o sentido de rotação há grandes diferenças, como seria de esperar. Em

latitude, o mínimo regista-se a 36°N, representativo das velocidades essencialmente zonais dos flutuadores nesta faixa. Ainda em latitude, os anticiclones, retirando o escoamento médio, apresentam velocidades sempre para Norte, ao contrário do previsto por Cushman-Roisin *et al.* (1990). O máximo de  $v$  regista-se a 33°N (devido, sem dúvida, a uma pequena série de ciclos com velocidade elevada a cerca de 22°W) e os mínimos são genericamente relativos a ciclos deslocando-se puramente para Oeste ( $v$  nulo). Os ciclones apresentam velocidades meridionais negativas a Norte de 35°N e positivas a Sul. Em relação às médias meridionais, ciclones e anticiclones apresentam um comportamento semelhante. A componente  $u$  (subtraída do escoamento médio) possui três picos máximos em módulo entre 22 e 15°W; a componente  $v$  apresenta muitos picos, salientando-se 32°W, 22°W e 15°W para anticiclones (o primeiro e o último referentes, cada um, a apenas uma série de ciclos) e 30°W e 15°W para ciclones.

## 5 Discussão e Conclusões

Com o intuito de identificar vórtices de mesoscala associados ao Sistema de Correntes dos Açores e descrever a sua distribuição, deslocação e características, foram analisadas trajectórias de flutuadores de superfície. Foram identificadas 138 séries de ciclos em 97 flutuadores de um total de 460 flutuadores presentes na região entre 1991 e 2007. Verificou-se que os flutuadores se deslocavam predominantemente para Oeste. Este resultado confere com as considerações de Cushman-Roisin *et al.* (1990), embora não se verifique que os vórtices ciclónicos se desloquem para Noroeste e os anticiclónicos para Sudoeste. As séries de ciclos foram observadas até um máximo de 218.5 dias, com um período médio de 16 dias e um diâmetro de cerca de 70 km. As velocidades de rotação rondam os 16 cm/s e as de translação cerca de 2 cm/s. Houve uma série a percorrer até 519 km de distância. São ainda de salientar os máximos de diâmetro, 206 km, de velocidade de rotação, 39.7 cm/s, e de translação, 4.6 cm/s, e finalmente de EKE,  $904 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ . No global, estes valores estão em concordância com Paillet (1999) e Le Cann *et al.* (2005).

As observações conferem também com os resultados de Alves *et al.* (2002), concretamente no que diz respeito à distribuição preferencial de ciclones a Sul do eixo médio da Corrente dos Açores e de anticiclones a Norte. Verifica-se um maior número na região Oeste, região que, segundo os autores, é mais propícia à génese de turbilhões. A faixa 28-38°N e a Oeste de 20°W é, de facto, muito rica em registos. A principal diferença consiste na presença de um maior número de ciclones e de maiores dimensões, não só em toda a região, mas também na faixa de latitudes centrada no eixo médio da Corrente. No entanto, a existência de grandes e numerosos ciclones (STORMs) nesta região foi verificada por Pingree *et al.* (1999). Os anticiclones a Sul dos Açores e a Norte de 34°N serão também exemplares de turbilhões associados a este Sistema.

A região ao largo de Portugal Continental apresenta menos registos e mais espaçados. Esta constatação pode dever-se à localização inter-giro, de circulação menos intensa, tal como imediatamente a Norte dos Açores, mas também ao facto de os vórtices característicos desta região (“swoddies”, “meddies”) terem dimensões tipicamente não superiores a 100-150 km e terem uma assinatura menos intensa à superfície, já que se deslocam abaixo dos 200 db. Os ciclones a 44-45°N a Oeste de 30°W pensa-se estarem

associados à Corrente Nor-Atlântica, enquanto que os turbilhões no quadrante SW entre os arquipélagos da Madeira e das Canárias são provavelmente devidos ao efeito de ilha, têm origem topográfica.

Os valores mais díspares encontram-se na partição SW, onde se verificou o número mais elevado de registos, enquanto que a partição SE, que por oposição apresenta o menor número de ocorrências, é aquela que tem menores diferenças entre mínimos e máximos. Ao relacionar as diferentes grandezas características dos vórtices que foram calculadas, destaca-se o aumento da velocidade de rotação com o raio e a diminuição do nº de Rossby com o raio, ambos os resultados significando que vórtices de maiores dimensões têm maiores períodos de rotação.

Na análise da região mais restrita à Corrente dos Açores, observa-se que, na sua grande maioria, os vórtices se deslocam contra o escoamento médio base. As médias zonais e meridionais de energia cinética turbulenta e do nº de Rossby mostram um mínimo a Norte da Corrente dos Açores e um máximo a Sul, com vários picos extremos em longitude devido ao viés da distribuição das séries de ciclos. No que diz respeito às velocidades médias de translação, a componente zonal é sempre para Oeste (máximo a 34°N, mínimo a 30°N) e a componente meridional é maioritariamente para Norte (máximo a 33°N, mínimo a 36°N), embora haja variações em função do sentido de rotação. Em longitude, ambas as componentes apresentam vários picos tal como a EKE e Ro.

Este trabalho consiste numa análise à existência e ao comportamento de vórtices associados ao Sistema de Correntes dos Açores através de dados *in situ*; a confirmação e complementaridade desta informação em trabalho futuro passaria pela observação de imagens de altimetria coincidentes com as datas de registos de vórtices pelos flutuadores, que forneceriam novos dados espacio-temporais de comparação e concederiam maior precisão aos valores. Outro procedimento que faria sentido seria comparar com simulações resultantes de modelos numéricos para o Sistema de Corrente dos Açores e comparar a ocorrência de ciclos observada com a simulada numericamente, tanto em frequência como em dimensões e ordens de grandeza.



## Referências

Alves, M. and A. C. de Verdiere (1999): Instability dynamics of a subtropical jet and applications to the Azores Front Current System: eddy-driven mean flow. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 29, pp. 837-864

Alves, M., F. Gaillard, M. Sparrow, M. Knoll, S. Giraud (2002): Circulation patterns and transport of the Azores Front-Current system. *Deep-Sea Research II* 49, pp. 3983-4002

Armi, L. and H. Stommel (1983): Four Views of a Portion of the North Atlantic Subtropical Gyre. *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 13, pp. 828-857

Beckmann, A., C. W. Böning, B. Brügge, D. Stammer (1994): On the generation and role of eddy variability in the central North Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research*, Volume 99, Issue C10, p. 20381-20392

Cromwell, D., P. G. Challenor, A. L. New, R. D. Pingree (1996): Persistent westward flow in the Azores Current as seen from altimetry and hydrography. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 101, C5, pp. 11923-11934

Cushman-Roisin, B., E. P. Chassignet, B. Tang (1990): Westward Motion of Mesoscale Eddies. *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 20, pp. 758-768

Kida, S., J. F. Price, J. Yang (2008): The Upper-Oceanic Response to Overflows: A Mechanism for the Azores Current. *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 38, pp. 880-895

Klein, B. and G. Siedler (1989): On the origin of the Azores Current. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 94, C5, pp. 6159-6168

Le Cann, B., M. Assenbaum, J.-C. Gascard, G. Reverdin (2005): Observed mean and mesoscale upper ocean circulation in the midlatitude northeast Atlantic. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 110, C07S05, doi: 10.1029/2004JC002768.

Le Traon, P.-Y. and P. De Mey (1994): The eddy field associated with the Azores Front east of the Mid-Atlantic ridge as observed by the Geosat altimeter. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 99, C5, pp. 9907-9924

Lumpkin, R. and Z. Garraffo (2005): Evaluating the Decomposition of Tropical Atlantic Drifter Observations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 22, pp. 1403-1415.

Lumpkin, R. and M. Pazos (2006): Measuring surface currents with Surface Velocity Program drifters: the instrument, its data, and some recent results. Chapter two of *Lagrangian Analysis and Prediction of Coastal and Ocean Dynamics (LAPCOD)* ed. A. Griffa, A. D. Kirwan, A. J. Mariano, T. Ozgokmen, and T. Rossby.

Maillard, C. and R. Käse (1989): The near-surface flow in the subtropical gyre south of the Azores. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 94, C11, pp. 16133-16140

Paillet, J. (1999): Central Water Vortices of the Eastern North Atlantic. *Journal of Physical Oceanography*, pp. 2487-2503

Peliz, A., J. Dubert, A. M. P. Santos, P. B. Oliveira, B. Le Cann (2005): Winter upper ocean circulation in the Western Iberian Basin—Fronts, Eddies and Poleward Flows: an overview. *Deep-Sea Research* 52, pp. 621–646

Peliz, A., J. Dubert, P. Marchesiello, A. Teles-Machado (2007): Surface circulation in the Gulf of Cadiz: Model and mean flow structure. *Journal of Geophysical Research*, 112, C11015, doi:10.1029/2007JC004159.

Pingree, R. D. and B. Le Cann (1991): Drifting buoy in the field of flow of two eddies on east Thulean Rise (Northeast Atlantic). *Journal of Geophysical Research*, Vol. 96, C9, pp. 16759-16777

Pingree, R. D. and B. Le Cann (1992): Anticyclonic eddy X91 in the southern Bay of Biscay, May 1991 to February 1992. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 97, C9, pp. 14353-14367

Pingree, R. D., C. Garcia-Soto, B. Sinha (1999): Position and structure of the Subtropical/Azores Front region from combined Lagrangian and remote sensing (IR/altimeter/SeaWiFS) measurements. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 79(5), pp. 769-792

Pond, S. and G. L. Pickard (1983): *Introductory Dynamical Oceanography*. Pergamon Press, 2nd edition.

Richardson, P. L. (1983): Eddy kinetic energy in the North Atlantic from surface drifters. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 88, C7, pp. 4355-4367

Shoosmith, D. R., P. L. Richardson, A. S. Bower, H.T. Rossby (2005): Discrete eddies in the northern North Atlantic as observed by looping RAFOS floats. *Deep-Sea Research II* 52, pp. 627-650

Tomczak, M. and J. S. Godfrey (2001): *Regional Oceanography: an Introduction*. Download version, 2nd edition



## Anexo A

### *Notas sobre turbilhões*

A circulação oceânica de larga escala processa-se através da conversão de energia potencial disponível inerente à estratificação do oceano, isto é, à inclinação das superfícies isobáricas, em energia cinética. Estes gradientes de pressão implicam a existência de gradientes horizontais de densidade e originam correntes resultantes do balanço geostrófico. As correntes serão tanto mais fortes quanto os gradientes de densidade. Por essa razão, os escoamentos mais intensos coincidem com a presença de frentes, regiões onde há o encontro de massas de água de características distintas e onde, portanto, os gradientes de densidade são particularmente contrastantes (Pond e Pickard, 1983).

Uma perturbação induzida num estado de repouso propagar-se-ia sem modificação para longe do ponto de origem. Porém, na presença de um escoamento, uma perturbação vai alimentar-se através da transferência de energia desse escoamento e vai desenvolver-se e crescer. A isto se chama instabilidade. Na circulação geral existem dois tipos principais de instabilidade, que podem co-existir: a instabilidade barotrópica e a instabilidade baroclínica. A primeira tem como fonte primária de energia a energia cinética do escoamento médio. A segunda requer uma outra condição para além do cisalhamento horizontal do escoamento: tem de existir também cisalhamento vertical, ou seja, variações de densidade na vertical, existindo portanto uma segunda fonte de energia potencial devido à inclinação das superfícies isopícnicas relativamente às isobáricas. A perturbação neste caso alimenta-se da energia potencial do escoamento médio (Cushman-Roisin, 1988). Em geral, as frentes são, pelas suas características, estruturas baroclínicas.

A instabilidade baroclínica é a principal responsável pela existência de vórtices de mesoscala, já que a existência de cisalhamento da velocidade do escoamento gera vorticidade. Admitindo como válida a aproximação geostrófica e tendo em conta as escalas destes fenómenos, obtém-se a aproximação quase-geostrófica, uma adaptação às ordens de grandeza da mesoscala e baseada na decomposição dos parâmetros numa soma de uma parte média e de uma parte perturbada. Esta nova aproximação afirma que há conservação de energia potencial através da advecção do escoamento geostrófico.

A vorticidade potencial  $q$  é definida por:

$$q = \frac{\zeta + f}{D} \quad (1)$$

onde  $\zeta$  é a vorticidade relativa, calculada directamente através do rotacional da sua velocidade ou, no caso da aproximação a um corpo sólido em rotação, é igual a duas vezes a sua velocidade angular.  $f$  é a vorticidade planetária inerente à rotação da Terra, igual a  $2\omega$ , em que  $\omega$  é a velocidade angular pontual à latitude  $\Phi$ , isto é,  $\omega = \Omega \sin \Phi$ , sendo  $\Omega$  a velocidade angular da Terra. Ou seja, a vorticidade planetária coincide com o parâmetro de Coriolis  $f = 2\Omega \sin \Phi$ . Por fim,  $D$  é a espessura de uma camada em que a densidade é uniforme, de tal forma que as componentes horizontais da velocidade não dependem da profundidade. Normalmente considera-se como sendo a camada compreendida entre a superfície e a termoclina permanente, ou entre esta e o fundo do oceano. Meridionalmente, se uma porção de água se desloca de Sul para Norte, está a incrementar a sua vorticidade planetária, logo, para a vorticidade potencial se conservar, a tendência é para a vorticidade relativa diminuir, i.e., adquirir rotação anticiclónica. De igual modo, se o deslocamento for de Norte para Sul, há uma diminuição de  $f$  e, consequentemente, uma tendência para a rotação ciclónica. O parâmetro  $D$  vai ganhar relevância nestas considerações em situações, por exemplo, de afundamento de massas de água mais densas como acontece nas frentes, pois a profundidade a que se pode considerar variação vertical nula da velocidade vai alterar-se (Pond e Pickard, 1983).

A aproximação quase-geostrófica reflecte um balanço entre forças inerciais e de rotação. As forças de impulsão geram oscilações em torno de um estado de repouso principal e a força de Coriolis actua no sentido de restituir o equilíbrio. As ondas que resultam das soluções da equação são as ondas de Rossby e, baseadas nas suas propriedades, definem-se duas grandezas que medem a importância relativa entre as forças inerciais e de rotação. A primeira, o raio de deformação de Rossby ( $\lambda$ ), também designada por “o mais instável comprimento de onda”, é a escala a partir da qual os efeitos de rotação são tão importantes quanto os de impulsão e define-se como:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2)$$

onde  $f$  é o parâmetro de Coriolis e  $c$  corresponde à velocidade de uma onda gravítica que é dada por  $\sqrt{g'H}$ , em que  $g'$  é a gravidade reduzida,  $H$  a profundidade da coluna de água. Utiliza-se o conceito de gravidade reduzida por se tratar de um fluido estratificado, cuja diferença de densidades não pode ser negligenciada devido à força de impulsão que gera. Esta grandeza é dada por  $g' = g\Delta\rho/\rho_0$ , em que  $g$  é a aceleração da gravidade,  $\Delta\rho$  a diferença de densidades entre duas parcelas de água adjacentes e  $\rho_0$  uma densidade de referência. Supondo uma perturbação inicial, se a escala desta for pequena em comparação com o raio de Rossby, o sistema tende para a posição de repouso, oscilando em torno do ponto de equilíbrio até o atingir; se pelo contrário for da mesma ordem ou superior, a perturbação vai crescer e tornar-se instável (Cushman-Roisin, 1988).

A segunda grandeza é o número de Rossby (Ro), é adimensional e define-se como o quociente entre as forças inerciais e a de Coriolis. Pode expressar-se de duas formas:

$$\frac{U}{fL} \quad (3a) \quad \text{ou} \quad \frac{\zeta}{f} \quad (3b)$$

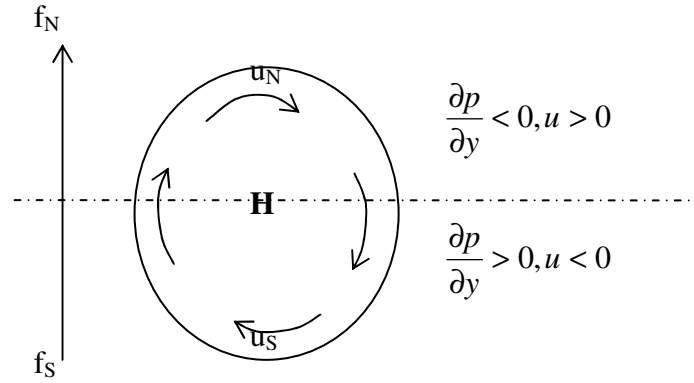
onde  $U$  é a escala típica da velocidade horizontal,  $L$  a escala típica espacial horizontal,  $f$  é o parâmetro de Coriolis (ou vorticidade planetária) e  $\zeta$  a vorticidade relativa, dada pelo rotacional da velocidade linear ou duas vezes a velocidade angular. Se o número de Rossby for grande, o efeito da rotação da Terra pode ser negligenciado. O quociente entre a vorticidade relativa e a planetária corresponde também a uma medida da importância relativa entre as duas forças mencionadas, já que a vorticidade relativa surge no sentido de contrabalançar os efeitos do deslocamento da parcela de água em latitude (Pond e Pickard, 1983). Estas duas grandezas são determinantes no processo de formação de vórtices e turbilhões.

Considerando uma corrente zonal para Este como é o caso da corrente dos Açores na sua essência, Cushman-Roisin (1988) demonstra que os turbilhões associados, tanto ciclones como anticiclones, serão advectados para Oeste. Pelo balanço geostrófico, temos:

$$fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} \quad (4)$$

Tomando a representação esquemática de um anticiclone da Figura A.0.1 e considerando o caso do Hemisfério Norte, na metade Norte do vórtice a pressão diminui quando a latitude aumenta (do centro para Norte) e a velocidade  $u$  é positiva (para Este),

enquanto que na metade Sul a pressão diminui quando a latitude diminui (do centro para Sul) e a velocidade  $u$  é negativa (para Oeste) (como indicado na figura). Está a supor-se escoamento base nulo.



**Figura A.0.1 – Representação esquemática de um anticiclone (adaptado de Cushman-Roisin, 1988).**

Por outro lado, duas condições têm de se verificar:

$$\left. \frac{\partial P}{\partial y} \right|_N = - \left. \frac{\partial P}{\partial y} \right|_S \quad (5)$$

$$u_N = -u_S \quad (6)$$

Como tal, e visto que  $f_N > f_S$ , a situação é resolvida supondo que o vórtice se desloca zonalmente com uma velocidade  $c$  não nula:

$$f_N(u_N + c) = - \frac{1}{\rho_0} \left. \frac{\partial P}{\partial y} \right|_N \quad (7a) \quad \text{e} \quad f_S(u_S + c) = - \frac{1}{\rho_0} \left. \frac{\partial P}{\partial y} \right|_S \quad (7b)$$

De (5) e (6) vem:

$$f_N(u_N + c) = -f_S(u_S + c) \quad (8)$$

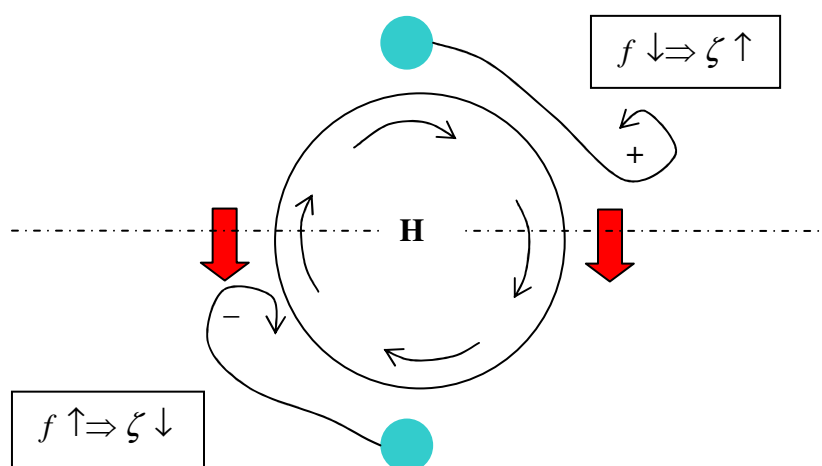
$$c = - \frac{f_N - f_S}{f_N + f_S} u \quad (9)$$

Como  $f_N > f_S$  e ambos são positivos no Hemisfério Norte,  $c < 0$ , ou seja, a deslocação faz-se para Oeste. O mesmo é válido para os ciclones.

Em termos de deslocação meridional e continuando a seguir as considerações de Cushman-Roisin (1988), a rotação no interior de um vórtice gera rotação no fluido envolvente, como esquematizado na Figura A.0.2. Uma parcela de água que se encontre a



Norte de um anticiclone, ao acompanhar o movimento deste, vai perder vorticidade planetária ( $f$  decresce), logo há ganho de vorticidade relativa positiva (rotação ciclónica) no flanco Este do vórtice. Pelo contrário, uma parcela a Sul vai ganhar vorticidade planetária ( $f$  cresce), logo por uma questão de compensação gera-se vorticidade relativa negativa (rotação anticiclónica) no flanco Oeste. A rotação destas partículas vai corresponder a um incremento no movimento do anticiclone para Sul (simbolizado pelas setas vermelhas no esquema). Para os ciclones, pelo mesmo raciocínio, haverá um incremento no movimento para Norte.



**Figura A.0.2 – Representação esquemática dos efeitos de rotação de um anticiclone nas parcelas de água circundantes (círculos a azul) (adaptado de Cushman-Roisin, 1988).**

Resumindo, perante uma corrente zonal, os vórtices associados anticiclónicos vão obter um movimento de translação para Sudoeste, enquanto que os ciclónicos terão preferencialmente um movimento de translação para Noroeste.

